



Universidad  
Carlos III de Madrid



DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DE  
MATERIALES E INGENIERÍA QUÍMICA

**PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE  
PALPADORES PHASED ARRAY PARA LA  
INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS DE  
ELEMENTOS FABRICADOS CON  
MATERIALES COMPUESTOS**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Tutores:** *Elisa María Ruiz Navas*  
*José Manuel Martín de Bernardo*

**Autora:** *María Elisa Dávila Ruiz*

*Leganés, Septiembre de 2010*









Título: EVALUACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY PARA LA INSPECCIÓN  
POR ULTRASONIDOS DE ELEMENTOS FABRICADOS CON MATERIALES  
COMPUESTOS

Autor: MARÍA ELISA DÁVILA RUIZ

Directores: ELISA MARÍA RUIZ NAVAS  
JOSÉ MANUEL MARTÍN DE BERNARDO

## EL TRIBUNAL

Presidente: \_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Secretario: \_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de  
20\_\_ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid,  
acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE





**MARÍA ELISA DÁVILA RUIZ**  
**SEPTIEMBRE 2010**





## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a José Manuel Martín de Bernardo, mi tutor en la empresa, su ayuda, seguimiento y dedicación hasta en su tiempo libre en el desarrollo de este proyecto, sin él no habría sido posible llevarlo a buen puerto. Gracias a Vicente Cortés por su interés y por ofrecerme la posibilidad de realizar el proyecto en Airbus, y a Álvaro Espada, por haber tenido un hueco para corregirme también el proyecto. A Elisa Ruiz, por haber sido mi tutora de las prácticas y del proyecto, por su ayuda, y a mis profesores del Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química.

A mis padres, sin quienes habría sido imposible ser quien soy y haber llegado hasta aquí, y a mis hermanos y tíos, que siempre han estado y estarán a mi lado, por su ánimo, comprensión y ayuda. En definitiva, por todo.

A Miguel de Diego y Maribel, por todo lo que he aprendido con ellos y por tratarme, más que como a una compañera, como familia. Al resto de mis compañeros de Airbus: a Alberto, Andrea, Rafa, Rocío Sánchez, etc. y a todos los que pasaron por allí, por acompañarme en este camino de inicio de mi vida laboral y habérmelo hecho más sencillo.

A mis amigas mostoleñas, Marina, Noelia y especialmente a Laura por soportar mis nervios más que nadie, por apoyarme y por los buenos momentos que me han hecho pasar, acogiéndome como una más del grupo desde el principio. A todos mis amigos de la Residencia FAM, por haber conseguido que me sienta como en casa todos estos años, a pesar de la distancia.

A mis amigos de Don Benito, demasiados para nombrarlos a todos, por estar ahí, en los buenos y en los malos momentos, por su apoyo y comprensión, por aguantarme, por ser como son: amigos.

A los que se me olvide mencionar.

GRACIAS A TODOS, DE CORAZÓN.







## ÍNDICE

<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>2. MÉTODOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA APLICADOS A MATERIALES COMPUESTOS.....</b>	<b>6</b>
2.1 Definición de ensayos no destructivos .....	6
2.2 Necesidad de los ensayos no destructivos .....	6
2.3 Tipos de ensayos no destructivos.....	7
2.4 Ensayos no destructivos en materiales compuestos.....	11
<b>3. MÉTODOS DE INSP. ULTRASÓNICA EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS. ....</b>	<b>12</b>
3.1 Fundamentos físicos.....	12
3.2 Equipos de ultrasonidos.....	27
3.3 Palpadores.....	28
3.4 Técnicas operativas .....	30
3.5 Modos de representación .....	35
<b>4. TECNOLOGÍA PHASED ARRAY EN EL CAMPO DE LOS ULTRASONIDOS.....</b>	<b>38</b>
4.1 Introducción .....	38
4.2 Fundamento de la tecnología Phased Array .....	39
4.3 Conceptos básicos .....	41



4.4 Elementos fundamentales en un sistema Phased Array .....	44
4.5 Ventajas de la utilización de la tecnología Phased Array.....	46
4.5.1 Velocidad de inspección .....	46
4.5.2 Cobertura de barrido .....	47
4.5.3 Nuevos modos de evaluación en tiempo real .....	48
4.5.4 Flexibilidad.....	48
4.5.5 Geometrías complejas .....	49
4.5.6 Otras ventajas .....	49
4.6 Limitaciones de la tecnología Phased Array.....	50
<b>5. PALPADORES PHASED ARRAY .....</b>	<b>51</b>
5.1 Tipos de palpadores Phased Array.....	51
5.1.1 1D o lineales .....	51
5.1.2 Otras geometrías .....	52
5.2 Defectología típica de palpadores .....	58
5.2.1 Convencionales.....	58
5.2.2 Phased Array .....	58
5.3 Leyes de excitación .....	60
5.4 Influencia de los parámetros de configuración .....	64
<b>6. POSIBILIDAD DE LA TECNOLOGÍA PHASED ARRAY EN LOS ACTUALES DISEÑOS EN MATERIALES COMPUESTOS.....</b>	<b>70</b>
6.1 Defectología típica .....	70
6.2 Sistemas semiautomáticos .....	75
6.3 Sistemas automáticos .....	76
6.3.1 Optimización de parámetros.....	80



<b>7. GENERALIDADES EN LA EVALUACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY ..</b>	<b>81</b>
7.1 Objetivos.....	81
7.2 Parámetros a evaluar .....	82
7.2.1 Ensayos de recepción (o de caracterización).....	82
7.2.2 Ensayos periódicos .....	86
7.2.3 Ensayos no programados.....	87
<b>PROCESO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>88</b>
<b>8. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY ....</b>	<b>89</b>
8.1 Fase de desarrollo.....	89
8.2 Puesta a punto del Procedimiento .....	90
8.2.1 Materiales y equipos .....	90
8.2.2 Ensayos realizados.....	93
8.2.2.1 Ensayos destinados al análisis en frecuencia .....	94
8.2.2.2 Ensayos destinados al diámetro y simetría del haz.....	100
8.2.3 Documentación final.....	116
8.2.4 Puesta en marcha .....	118
8.3 Tiempos .....	119
<b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS .....</b>	<b>121</b>
<b>9. CONCLUSIONES.....</b>	<b>122</b>
<b>10. LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS .....</b>	<b>126</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>132</b>





## OBJETIVOS

En el presente proyecto se describen los fundamentos de la evaluación de palpadores de tecnología Phased Array empleados en inspecciones no destructivas mediante ultrasonidos. Esta tecnología ha sido utilizada de forma intensiva en el campo de la Medicina desde principios de los años 70; sin embargo, su aplicación en los ensayos no destructivos se ha visto retrasada por la dificultad que supone tratar con medios sólidos en lugar de únicamente con líquidos.

Otro de los motivos que justifican tal retraso son las grandes variaciones que existen en las propiedades acústicas de los metales, materiales compuestos, cerámicos y plásticos, así como en las enormes diferencias de espesores y formas geométricas de los elementos industriales; mientras que la composición y la estructura del cuerpo humano hacen relativamente sencillos el diseño de los instrumentos y la interpretación de las imágenes que se obtienen.

El objetivo principal del presente proyecto y que, a su vez, ha constituido el hito inicial del mismo, ha sido **realizar un Procedimiento en el que se describen los pasos a seguir para evaluación de palpadores tipo Phased Array empleados para la inspección por ultrasonidos de elementos fabricados con materiales compuestos, de acuerdo a la normativa aplicable interna de Airbus AITM 6-0016 [1]**. Al mismo tiempo supone una aportación a la escasa literatura en castellano sobre el tema. Este Procedimiento es aplicable a todos los palpadores Phased Array que vayan a ser utilizados tanto en instalaciones automáticas como en equipos semiautomáticos o manuales.





## RESUMEN

En el desarrollo y fabricación de elementos de material compuesto de matriz polimérica reforzados con fibra, y en especial de fibra de carbono en la industria Aeronáutica, una de las principales razones que encarecen la producción es la inspección de estos lotes de piezas para asegurar la ausencia de defectos.

Por esta razón, es de enorme importancia la reducción de costes asociados la inspección no destructiva por ultrasonidos, siendo la disminución del tiempo de inspección por pieza un método de gran efectividad para conseguirlo. Para ello se empezaron a utilizar instalaciones automáticas y, más recientemente, implementando la nueva tecnología Phased Array, optimizar aún en mayor medida el tiempo empleado para estas inspecciones.

Los palpadores de ultrasonidos han de garantizar que el 100% de la superficie de los elementos fabricados con materiales compuestos, tanto de geometría sencilla como compleja (estructuras de revestimientos de alas, estabilizadores, costillas, largueros, etc.), quede inspeccionada y libre de defectos para su posterior uso de forma completamente segura.

Debido a la posible pérdida con el tiempo de características ultrasónicas de los palpadores Phased Array, que pueden afectar a los resultados de las inspecciones, este Proyecto Fin de Carrera tiene como propósito el desarrollo de un Procedimiento concreto que describa, paso a paso, el proceso de evaluación de estos palpadores de nueva tecnología para la inspección por ultrasonidos de elementos fabricados con materiales compuestos. De este modo se permite aislar y evaluar los fallos detectados, y con ello mejorar la calidad de las inspecciones a realizar. Al mismo tiempo se llena un hueco prácticamente vacío en la literatura en castellano sobre el tema.



Este proyecto se llevó a cabo en su totalidad en las instalaciones del Laboratorio de Ensayos No Destructivos del departamento de Materiales y Procesos de la factoría de Airbus Operations S.L, situada en Getafe (Madrid). Hasta ahora, en la empresa sólo existía un procedimiento para la evaluación de palpadores convencionales, tanto de contacto como de inmersión, pero dada la gran evolución de la tecnología Phased Array surge la necesidad de la creación de un procedimiento específico para estos palpadores.

Para llegar al Procedimiento definitivo de evaluación de palpadores de Phased Array se dedicó un período de, aproximadamente, cuatro meses en horario laboral. Se realizaron muy numerosos y diferentes ensayos y pruebas hasta lograr entender el software de evaluación y el comportamiento concreto de este tipo de palpadores (que difieren bastante respecto a los de tipo convencional, por la dificultad que entrañan por su elevado número de elementos), optimizar los parámetros de trabajo, redactar la memoria del propio Procedimiento oficial y crear el modelo de informe de los resultados de la evaluación de los palpadores.

Entre los ensayos realizados destacan los dedicados al Análisis en Frecuencia de los palpadores. Para ello se estudiaron las dos posibilidades existentes: en cuanto al intervalo de frecuencia a utilizar, banda ancha (de 2 a 30 MHz) y banda estrecha (a 5 MHz) y en lo referente al material, se realizaron sobre acero, metacrilato (PMMA), aluminio y material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibra de carbono (CFRP). A partir de estos ensayos se concluyó que las condiciones para realizar las evaluaciones de palpadores serían en banda ancha y sobre una probeta patrón de PMMA.

El siguiente grupo de ensayos fueron los destinados a estudiar el diámetro y simetría del haz ultrasónico generado por estos palpadores. Para ello se realizaron numerosas pruebas para analizar cómo se comportaba este haz: si provenía de un elemento individual o de varios en conjunto. Como conclusión de este ensayo, la apertura óptima para un palpador de un determinado número de elementos es aquella que maximiza la señal con la menor ganancia posible, normalmente usándose una apertura (grupo) de ocho elementos. Dentro de este grupo de ensayos también se encuentran los destinados a elegir la distancia de trabajo óptima para





realizar las pruebas, concluyendo que sería aproximadamente el punto de máxima presión acústica del palpador.

La creación de este Procedimiento de evaluación de palpadores Phased Array ha supuesto numerosas aportaciones para la empresa Airbus Operations S.L, siendo algunas de ellas: mayor calidad en el suministro del material, adelanto tecnológico dado que antes sólo existía un Procedimiento para evaluar palpadores convencionales, ventaja competitiva frente a otras empresas por ser un Procedimiento totalmente novedoso y puntero, ahorro de costes asociado a la reducción significativa de tiempos de inspección, etc.





## ABSTRACT

In the development and manufacturing of polymer matrix composite material reinforced with fiber elements, and especially with carbon fiber in the Aeronautical industry, one of the main reasons that rises the price of the production is the inspection of these batches to assure the absence of flaws.

For this reason, the reduction of costs associated with the ultrasonic inspection is enormously important, and the most efficient method to obtain it is decreasing the time of inspection per piece. For this reason, the automatic facilities and, more recently, the new Phased Array technology has been implemented to optimize the time necessary for these inspections.

With the use of ultrasonic transducers it must be guaranteed that 100% of the parts made with composite materials, (simple as well as complex-geometry structures of wing skins, stabilizers, ribs, spars, etc.), are inspected and free of flaws for their later use in a completely safe way.

Eventually, the ultrasonic characteristics of the Phased Array transducers might be deteriorated, which can affect the results of the inspections. The aim of this Final-year project is the development of a detailed procedure that describes the process of evaluation of these ultrasonic transducers of new technology for the inspection of parts manufactured with composite materials. This allows to isolate and evaluate detected failures, and consequently to improve the quality of the inspections. As an additional achievement, an empty gap in the Spanish literature about the topic is filled with this dissertation.



The entire project was carried out in the Non-destructive Testing laboratory facilities belonging to the department of Materials & Processes in the Airbus Operations S.L. factory, located in Getafe (Madrid). Until now, only a procedure for the evaluation of conventional transducers (contact as well as immersion transducers) existed in the company, but given the great development of the Phased Array technology, the need of the creation of a specific procedure for these transducers comes up.

The definitive Procedure of evaluation of Phased Array transducers took approximately four months in working hours to be completed. Very numerous and different tests were performed in order to understand the software of evaluation and the specific behaviour of these transducers (that differs quite a lot from the conventional transducers, due to the difficulty that the high number of elements involve). For the hole of that period the parameters of work were optimized, the official procedure was written and a template of the results report was created.

One of the most important tests performed was the transducer Analysis of Frequency. There are two possibilities regarding the frequency interval to be used: broad band (from 2 to 30 MHz) and narrow band (5MHz); both of them were studied. Regarding the material, the tests were performed on standards made of steel, aluminium, methacrylate (PMMA) and Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). According to the results, the best conditions to evaluate the Phased Array transducers are broad band frequency and a PMMA reference standard.

The next group of tests were intended to study the diameter and beam symmetry of these transducers. To achieve that, a great amount of tests were carried out to analyse the behaviour of the beam when it came from a single element or from several elements firing together. To conclude this test, the best aperture for a transducer of several elements is the one that maximizes the signal with the lowest gain possible. The usual aperture chosen is eight elements. Within this group of tests, there are also tests set aside for the choice of the



optimum working distance, concluding that it is approximately the maximum acoustic pressure of the transducer ( $Y_o^+$ ).

The creation of this procedure to evaluate Phased Array transducers means great contributions to Airbus Operations S.L., such as: better quality in the material supply, technological advance since before there was just one procedure to evaluate conventional transducers, which is a competitive advantage compared to other companies because this is a completely new and leading procedure, cost savings associated to significant reduction in the inspection times, etc.





# INTRODUCCIÓN







# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

En la fabricación y mantenimiento de piezas de fibra de carbono para uso aeronáutico, es necesario realizar inspecciones no destructivas con el fin de asegurar el suficiente nivel de calidad de éstas. Dentro de los diferentes métodos, la inspección por ultrasonidos es, hoy por hoy, el único método que cumple con los requerimientos actuales.

Históricamente se comenzó utilizando sencillos palpadores convencionales (tanto de contacto como de inmersión) que sólo podían generar un haz ultrasónico determinado. El desplazamiento por la superficie de la pieza se realizaba únicamente de manera manual y los resultados de dicha inspección se presentaban como una serie de picos que se correspondían con los ecos devueltos por las discontinuidades del material en tiempo real. Esta metodología es lenta y su interpretación requiere conocimiento y experiencia por parte del inspector y dependencia de sus aptitudes.

Con el fin de mejorar esta situación, las inspecciones fueron automatizadas: palpadores muy similares a los que se habían utilizado para las inspecciones manuales eran ahora colocados en plataformas de inspección que barrían automáticamente toda la superficie de la pieza. De esta manera, además de reducir el tiempo empleado y el esfuerzo exigido al inspector, se consiguió asegurar que la pieza hubiera sido inspeccionada en su totalidad y añadía un registro permanente de la misma, optimizando así su evaluación.

Pero los tiempos de inspección con un solo palpador seguían siendo excesivos, por lo que se optó por integrar varios palpadores en un único cabezal de inspección, surgiendo así los multipalpadores, también llamados sondas multicanal.

Estos multipalpadores son una de las técnicas más utilizadas en la actualidad, a pesar de tener también sus inconvenientes. El cabezal que contiene los transductores es bastante voluminoso y sólo permite inspeccionar zonas relativamente lisas y con curvaturas suaves.

Al mismo tiempo que los cabezales multipalpador eran adoptados en las inspecciones automáticas se comenzó a estudiar el uso de un nuevo tipo de transductor que ya venía siendo utilizado en Medicina: los palpadores *Phased Array*. Esta tecnología ofrece, entre otras ventajas, la oportunidad de ampliar el área estudiada por unidad de tiempo o dirigir y focalizar el haz de inspección disminuyendo el tiempo y el esfuerzo necesarios de manera notable. Los fundamentos en que se basa, para ello, son sobradamente conocidos pues, como se ha mencionado, se venían usando desde hace años en los radares y en Medicina. De hecho, en este último campo se utilizan palpadores ultrasónicos *Phased Array* en ejemplos tan conocidos como son las ecografías, en los que se muestra un B-Scan de, por ejemplo, el útero materno en tiempo real, como se puede observar en la figura 1.1.



**Figura 1.1:** Ecografía en B-Scan. [2]

La disminución de los precios en los productos relacionados con esta tecnología, unida al incremento en la automatización de los procesos de inspección han conducido a fijar la atención en esta tecnología *Phased Array* como medio de obtener una mayor productividad y una mejora en la calidad de las inspecciones, disminuyendo los fallos potenciales, así como otras numerosas ventajas que se destacarán a lo largo del presente proyecto.



Dadas las posibles degradaciones de características ultrasónicas (por golpes, desoldaduras, etc.) que sufren los palpadores, tanto convencionales como Phased Array, y que puedan afectar a los resultados de las inspecciones, este proyecto se fundamenta en el desarrollo de un Procedimiento de evaluación de estos palpadores de nueva tecnología, de acuerdo a la norma interna de Airbus AITM 6-0016 [1] aplicable, con el que se asegurará su capacidad para conseguir su correcto funcionamiento requerido bajo condiciones reales de inspección.

Este Procedimiento de evaluación de palpadores Phased Array ha supuesto una gran aportación para la empresa. Hasta la fecha sólo existía un procedimiento de evaluación para palpadores de tipo convencional, por lo que la empresa logra adquirir una cierta ventaja competitiva frente al resto.

El presente proyecto se ha estructurado de modo que se parte de la definición de ensayos no destructivos y la justificación de su necesidad en el capítulo 2, haciendo distinción entre los métodos de inspección más importantes y de mayor aplicación para componentes fabricados con materiales compuestos, sobre todo de fibra de carbono (CFRP). De entre todos ellos, el método de Ultrasonidos es el más extendido en la industria Aeronáutica, y constituye el tema central del proyecto, por lo que sus principios básicos se expondrán en el capítulo 3.

Una vez presentado el método de inspección ultrasónico y conocidos sus principios, en el capítulo 4 se comienza la descripción de la tecnología Phased Array, introduciendo sus fundamentos y definiendo los elementos mínimos para su utilización. En los siguientes capítulos se desarrollarán aspectos más concretos de la tecnología, como la descripción de los palpadores necesarios y su posible defectología, las leyes de excitación y la influencia de ciertos parámetros de configuración (capítulo 5), así como las posibilidades que ofrece la tecnología Phased Array en diseños actuales con materiales compuestos (capítulo 6), donde se trata la defectología típica que detectan en los materiales compuestos, y se presentan brevemente los sistemas de inspección automáticos y semiautomáticos.

A continuación, se dedican los siguientes capítulos a la evaluación de palpadores, explicando los fundamentos generales del proceso en el capítulo 7 y destinando el capítulo 8 a



las necesidades específicas de los de tipo Phased Array, las fases de su desarrollo y puesta a punto hasta llegar al Procedimiento final y el estudio de tiempos.

Se cerrará al fin el proyecto exponiendo, como conclusión, las ventajas más relevantes de la creación de este Procedimiento, sus aportaciones a la empresa y las posibilidades de mejora en cuanto al proceso y al software de evaluación de palpadores Phased Array actuales, derivadas del presente estudio.



## **CAPÍTULO 2**

# **MÉTODOS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA APLICADOS A MATERIALES COMPUESTOS**

### **2.1 DEFINICIÓN DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

---

Se denominan ensayos no destructivos a aquéllos cuya finalidad es definir la calidad intrínseca de un componente sin dañarlo, de modo que pueda ser utilizado posteriormente en las funciones para las que fue diseñado.

Estos métodos se sirven de equipos y materiales específicos, y deben ser llevados a cabo por personal debidamente cualificado.

### **2.2 NECESIDAD DE LOS ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

---

Inicialmente, los ensayos no destructivos comenzaron a aplicarse en aquellos sectores en los cuales la seguridad era un factor primordial, siendo éstos el sector aeronáutico y el sector energético (industria nuclear), principalmente. Posteriormente, estos ensayos se fueron introduciendo en otros sectores, ya no sólo para garantizar la seguridad, sino para reducir los costes derivados de la “no calidad”.

Centrándonos en el sector aeronáutico y, dentro de éste, en la producción de componentes de material compuesto, la realización de ensayos no destructivos es ineludible. Como ya se ha mencionado, hay que garantizar la seguridad, aseverando que todo



componente fabricado cumple con la calidad especificada. Una posible solución consistiría en efectuar controles estadísticos de la producción, de forma que los ensayos se realicen sólo sobre ciertos componentes. De este modo, la aplicación de ensayos no destructivos podría no ser necesaria, pues cabría la posibilidad de llevarse a cabo ensayos destructivos sobre estos componentes aislados.

Sin embargo, este modo puede contemplarse únicamente cuando los métodos de fabricación son muy conocidos y fiables, no siendo éste el caso de los procesos de fabricación con materiales compuestos. Tampoco se puede aplicar el “sampling”, por el volumen de fabricación que no es similar al de otras industrias, y por no cumplir los criterios de normas internacionales al respecto.

En su lugar, se deberá realizar el control de calidad sobre toda la producción, de forma que ya no es posible emplear ensayos destructivos para ello, pues si así lo hiciéramos dañaríamos los componentes, impidiendo su posterior utilización.

Las ventajas del empleo de ensayos no destructivos son:

- Aseguran la calidad del producto
- Son aplicables en todas las fases de la vida del componente
- Proporcionan beneficios económicos
- Soportan el desarrollo de nuevos materiales, procesos de fabricación, etc.

## **2.3 TIPOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

---

Todo método de ensayo no destructivo se basa en la aplicación de un método físico. Así, dependiendo del principio utilizado, se puede hacer la siguiente clasificación:

### **▪ Inspección visual**

Es el método de ensayo más sencillo. Se basa en el empleo de la propia visión, ayudándose en ocasiones de lupas de 3 a 5 aumentos y de útiles tales como baroscopios, endoscopios, videoscopios, etc.



### ▪ Ultrasonidos

Se basa en la introducción de ondas mecánicas en el interior del componente a inspeccionar, las cuales se propagan a través del material y sufren los fenómenos propios de reflexión, refracción, atenuación, difracción, etc. La presencia de heterogeneidades se pone de manifiesto a través de las alteraciones que se producen en la propagación de dichas ondas con respecto a lo esperado en un material homogéneo (figura 2.1). Esta técnica se desarrollará en profundidad en el siguiente capítulo.



**Figura 2.1:** *Inspección no destructiva por Ultrasonidos.* [3]

### ▪ Corrientes inducidas

Mediante un campo magnético se induce una corriente eléctrica en la superficie del material, la cual genera a su vez otro campo magnético. Cuando existe un defecto superficial se producen variaciones en el campo magnético inducido, permitiendo la determinación del estado de la pieza. A día de hoy, este método no es aplicable a materiales compuestos, excepto en casos muy específicos.

### ▪ Líquidos penetrantes

Se emplea un líquido con gran capacidad de mojar la superficie, de modo que se introduce en las grietas superficiales del componente. Tras aplicar un revelador, se realiza una inspección visual en busca de líquido rezumante. Salvo casos muy específicos, no es aplicable a materiales compuestos.

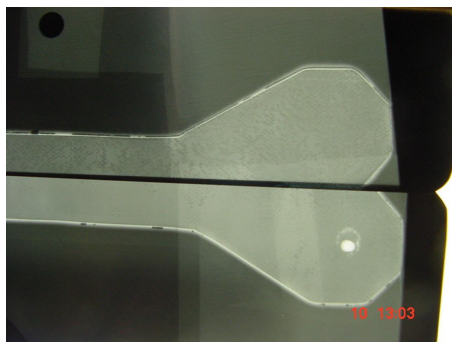
### ▪ Partículas magnéticas

Se aplica un campo magnético sobre el espécimen de ensayo y se depositan pequeñas partículas magnéticas, de modo que éstas se orientan siguiendo las líneas de campo. En

presencia de algún defecto, estas líneas de campo se distorsionan, permitiendo así su detección. Este método no es aplicable a materiales compuestos.

#### ▪ Radiología

Esta técnica radica en exponer la pieza a rayos X y observar las diferencias de absorbanza que presenta el componente estudiado. Para poder observarlo, detrás del componente se coloca una película sensible o una pantalla fluorescente frente a los rayos X y se expone la pieza a dicha radiación (figura 2.2). Exige trabajar con ondas electromagnéticas, lo que conduce a que su uso se restrinja a aquellos casos en los que sea la única opción viable (soldaduras, geometrías muy complejas, etc.).



**Figura 2.2:** Inspección no destructiva por Radiología. [4]

#### ▪ Termografía

Consiste en detectar variaciones en la conductividad y absorción térmica de la pieza que delaten la posible presencia de defectos o inclusiones. Ofrece buenos resultados pero su efectividad se reduce a defectos superficiales y/o subsuperficiales, siempre que sus características térmicas sean suficientemente diferenciadas con el resto del elemento. Por ejemplo, es muy poco sensible a la porosidad superficial, mientras que es muy adecuado para encontrar inclusiones de agua en las piezas con estructura sandwich. Esta limitación a defectos superficiales o subsuperficiales se debe a su poca capacidad de penetración, que en laminados compactos queda limitada a unos 3mm.

#### ▪ Impedancia mecánica

Este método detecta diferencias locales de rigidez a través de ondas mecánicas que se propagan en el elemento a inspeccionar. La figura 2.3 muestra el equipo utilizado en este tipo de ensayos no destructivos.

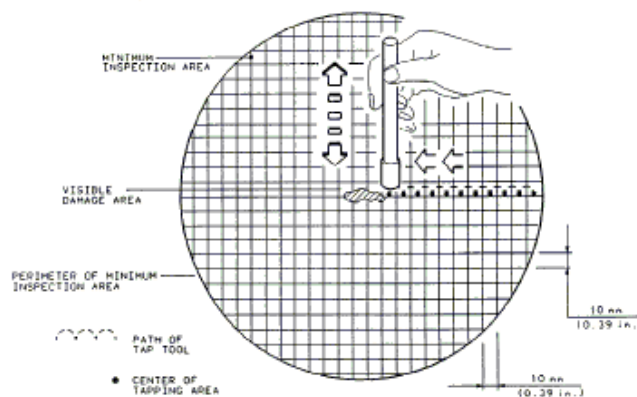




**Figura 2.3:** *Inspección no destructiva por impedancia mecánica.* [5]

### ▪ Tap Coin

Esta técnica se basa en la variación de la respuesta acústica frente a un golpeteo al que es sometida la pieza (figura 2.4). Esto provoca que el análisis tenga un fuerte componente influenciado por el ser humano. Es útil en la detección de defectos cercanos a la superficie de inspección, siempre y cuando la relación entre el cambio de frecuencia audible debida al defecto y su superficie sea suficiente para su apreciación por el inspector. Su uso prácticamente se ve reducido a la inspección de estructuras sandwich, para detectar descolados entre el núcleo y las pieles.



**Figura 2.4:** *Inspección no destructiva por Tap Coin.* [3]

No todos los métodos son aplicables a una inspección concreta de modo que, para cada caso habrá que seleccionar el método más adecuado, en función de:



- Geometría y material del espécimen de ensayo
- Defectología a detectar
- Capacidad del método de detectar el tamaño mínimo de defecto requerido en los criterios de aceptación
- Accesibilidad
- Seguridad y contaminación

## **2.4 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS EN MATERIALES COMPUESTOS**

---

Debido a las características propias de los componentes fabricados en material compuesto, los métodos de ensayos no destructivos que se aplican para ellos son:

- 1) Ultrasonidos
- 2) Radiología
- 3) Tap Coin
- 4) Impedancia mecánica
- 5) Termografía
- 6) Inspección visual
- 7) Inspecciones ópticas

estando enumerados en orden decreciente de importancia.

El método de inspección ultrasónica es, sin duda, el más extendido en la aplicación de materiales compuestos, siendo el método en el cual se encuadra el presente proyecto.



## **CAPÍTULO 3**

# **MÉTODO DE INSPECCIÓN ULTRASÓNICA EN ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Una vez explicada la necesidad de los métodos de ensayos no destructivos en el entorno aeronáutico y su especial importancia en los componentes fabricados en fibra de carbono, se analizará en este capítulo el método de ultrasonidos, sin duda el de mayor utilización en este ámbito.

Se comenzarán introduciendo los fundamentos físicos del método, pues no podrá iniciarse la descripción de la tecnología Phased Array sin tener al menos un conocimiento básico de éstos. Seguidamente se describirán los equipos utilizados en estas inspecciones y se tratarán los distintos tipos de palpadores y acoplantes. Finalmente, se cerrará el capítulo con una clasificación de las técnicas operativas y de los distintos tipos de representación de las indicaciones.

### **3.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS**

---

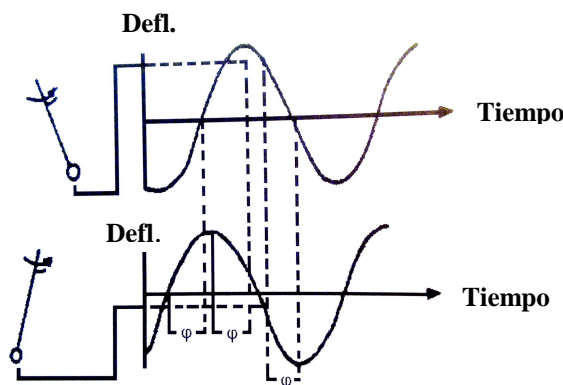
Los ultrasonidos son ondas elásticas del mismo tipo que los sonidos audibles, diferenciándose únicamente en la frecuencia de operación y forma de propagación. En la zona ultrasónica del espectro acústico, la frecuencia de oscilaciones se encuentra por encima del límite teórico de la audición humana ( $f > 20$  KHz).

Por tratarse de ondas de origen mecánico se propagan en todos los medios materiales, interactuando con ellos en forma de fenómenos de reflexión, refracción y difracción, fundamentándose los métodos de inspección ultrasónica en la información extraída de esta

interacción. Las ondas son enviadas a través del material a inspeccionar, generadas por un material piezoeléctrico o transductor de comportamiento reversible y de frecuencia fija, generalmente comprendida entre 1 y 5 MHz. Este transductor convierte los impulsos eléctricos en energía mecánica en forma de vibraciones, y viceversa.

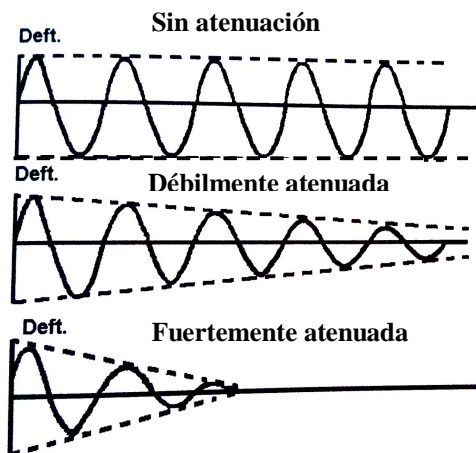
Las vibraciones ultrasónicas se caracterizan por una serie de parámetros:

- **Frecuencia ( $f$ ):** Es el número de oscilaciones por unidad de tiempo de una partícula.
- **Longitud de onda ( $\lambda$ ):** Distancia entre dos partículas con el mismo estado de movimiento.
- **Velocidad acústica ( $c$ ):** Velocidad de propagación de la onda para una condición dada.
- **Amplitud de oscilación ( $A$ ):** Es el máximo desplazamiento de una partícula respecto a su posición de equilibrio.
- **Velocidad instantánea de vibración ( $v$ ):** Es la velocidad de la partícula en su movimiento. Para hacer referencia a su valor máximo se utilizará  $V$ .
- **Presión acústica ( $P$ ):** Fuerza o fuerza cortante por unidad de superficie normal a la superficie de la onda, dependiendo de si se trata de ondas longitudinales o transversales.
- **Fase:** Es la condición instantánea dentro de una oscilación. Este concepto se comprende fácilmente cuando se comparan dos oscilaciones distintas (figura 3.1), en la que aparece una diferencia de fase.



**Figura 3.1:** Representación de la diferencia de fase entre dos oscilaciones distintas. [6]

- **Atenuación:** Es la disminución de amplitud de una oscilación, en función del tiempo. La atenuación es debida a la suma de la dispersión y la absorción. En la figura 3.2 se aprecia la diferencia en una misma onda sin atenuar, débilmente atenuada, y fuertemente atenuada.

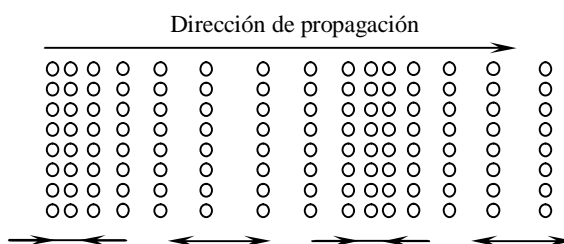


**Figura 3.2:** Diferencia entre una onda sin atenuación, débilmente atenuada y fuertemente atenuada. [6]

### Modos de vibración o tipos de onda:

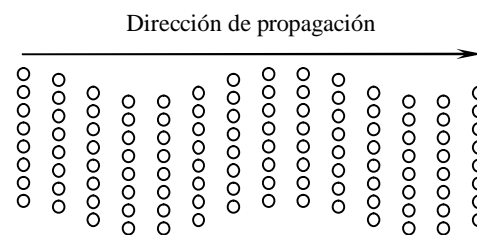
La oscilación de las partículas en un medio puede materializarse de distintas formas, por lo que se distinguen varios modos de onda:

- **Ondas longitudinales:** Como se ve en la figura 3.3, en este tipo de onda, las partículas oscilan en la misma dirección que el sentido de propagación de la onda. La fluctuación de las partículas respecto de su posición de equilibrio hace que existan zonas de compresión (partículas muy juntas), y zonas de depresión (partículas muy separadas). Es por esto que también se conocen como ondas de presión u ondas de densidad.



**Figura 3.3:** Posición instantánea de las partículas excitadas por una onda longitudinal [7]

- **Ondas transversales o cortantes:** En este tipo de onda, la vibración de las partículas es perpendicular al sentido de propagación (figura 3.4). Esta vibración se produce al aplicar una fuerza cortante y periódica en el borde de un material sólido. Dicha fuerza cortante se transmite a las partículas de planos adyacentes, dando lugar a oscilaciones transversales retardadas, según su distancia al plano de excitación.



**Figura 3.4:** Posición instantánea de las partículas excitadas por una onda transversal. [7]

Estas ondas se transmiten mediante esfuerzos de cortadura, por lo que no se propagarán en gases ni líquidos por su condición de fluidos, puesto que no pueden transmitir este tipo de ondas al carecer de enlaces elásticos transversales.

- **Ondas superficiales o de Rayleigh:** Son ondas transversales que se propagan por la superficie de un medio semiinfinito, siendo la amplitud de las oscilaciones despreciable a profundidades del orden de la longitud de onda.
- **Ondas de Love:** Ondas transversales cuyas direcciones de propagación y de oscilación están contenidas en el plano de la chapa en que se propagan.
- **Ondas de Lamb:** Cuando el medio es finito y su espesor es comparable a la longitud de onda, se produce la oscilación de las partículas de dos posibles formas:
  - Ondas de dilatación: la fibra neutra vibra en el modo longitudinal.
  - Ondas de flexión: la fibra neutra vibra en modo transversal.

De todos estos tipos de onda, las que sin duda tienen mayor importancia en los ensayos no destructivos son las longitudinales y transversales.



### **Ondas esféricas, planas y cilíndricas:**

Las ondas se clasifican en función del lugar geométrico de las partículas con la misma fase. De este modo se distinguen:

- **Ondas esféricas:** Las partículas con igual fase se localizan en esferas.
- **Ondas planas:** Los puntos con igual fase se encuentran sobre un plano.
- **Ondas cilíndricas:** Las partículas con igual estado de oscilación definen un cilindro.

Estas ondas sólo son teóricas pues se deben a fuentes puntuales (esféricas), planos infinitos (planas) y fuentes lineales infinitas (cilíndricas).

### **Velocidad acústica:**

Dependiendo del modo de onda de que se trate, la velocidad de propagación de ésta en un medio concreto definido por sus constantes elásticas (coeficiente de Poisson  $\mu$ , módulo de elasticidad  $E$  (y  $G$ ), así como por su densidad  $\rho$ ) vendrá definida por las siguientes expresiones, válidas para sólidos isótropos:

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \text{para ondas longitudinales} \quad (3.1)$$

$$C_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{para ondas transversales} \quad (3.2)$$

En la tabla 3.1 se presentan algunos valores típicos de estas velocidades para diversos materiales:



Material	C <sub>L</sub> (m/s)	C <sub>T</sub> (m/s)
Acero	5820	3190
Aluminio	6320	3080
Agua	1483	-
Aceite	1740	-
CFRP	3065	1340
Titanio	6070	3110

**Tabla 3.1:** Valores típicos de velocidades acústicas para diversos materiales. [6]

### **Impedancia acústica:**

La impedancia acústica ( $Z$ ) es una propiedad del material, definida como la relación entre la presión acústica y la velocidad máxima de vibración de los elementos de masa (partículas).

La fórmula para el cálculo del valor de la impedancia se apoya en la teoría de la propagación de las ondas acústicas, que establece que la impedancia es una constante del material, siendo proporcional a la densidad del medio y a la velocidad acústica de la onda en dicho medio:

$$Z = \rho \cdot C \quad (3.3)$$

Otra posible definición de esta propiedad viene dada por la fórmula:

$$Z = \frac{P}{V} \quad (3.4)$$

De acuerdo con esta última definición, la impedancia acústica puede entenderse como la resistencia de un medio a la vibración. Así, materiales con alta impedancia acústica presentarán baja velocidad de vibración, mientras que las partículas en medios con baja impedancia acústica experimentarán vibraciones de alta velocidad.





### **Energía acústica específica:**

Es la energía por unidad de volumen, y viene dada por la siguiente expresión:

$$E_e = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{ZC} \quad (3.5)$$

### **Intensidad acústica:**

Es el flujo de energía, definiéndose, por tanto, como el producto de la energía específica y la velocidad acústica:

$$I = \frac{1}{2} \rho C V^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{Z} \quad (3.6)$$

La magnitud de las indicaciones de los equipos ultrasónicos es proporcional a la presión acústica por lo que, tanto la energía específica como la intensidad acústica, serán proporcionales al cuadrado de la magnitud de las indicaciones.

### **Amplitud máxima de oscilación:**

Es la oscilación máxima de las partículas respecto a su posición neutra, y viene dada por la fórmula:

$$\frac{A}{\lambda} = \sqrt{\frac{I}{2\pi^2 \rho C^3}} \quad (3.7)$$

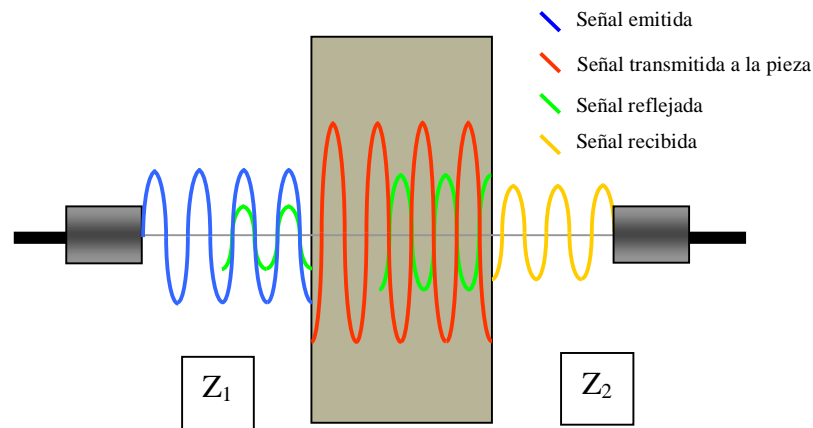
### **Comportamiento de las ondas en superficies límite:**

Cuando una onda ultrasónica incide sobre una superficie límite, es decir, en una superficie de separación de dos medios distintos, parte de la energía se propagará en el segundo medio y otra parte se reflejará, radiándose de nuevo en el medio de origen.

Para analizar el comportamiento en superficies límite, se consideran de forma separada los casos de incidencia normal e incidencia oblicua:

- **Incidencia normal:**

Como ya se ha mencionado, parte de la energía incidente se transmitirá al segundo medio en forma de ondas longitudinales, y parte volverá en la misma dirección que la incidente, también como onda longitudinal. Ver figura 3.5.



**Figura 3.5:** Esquema de la interacción de la onda con incidencia normal. [4]

Se definen los coeficientes de reflexión y transmisión como:

$$R' = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.8)$$

$$T' = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3.9)$$

donde  $P_i$  es la presión acústica de la onda incidente,  $P_r$  la de la onda reflejada y  $P_t$  la de la onda transmitida.

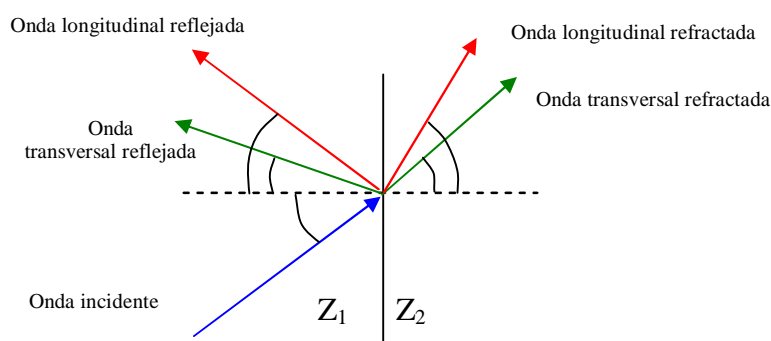
De la definición de estos coeficientes se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La presión de la onda reflejada es independiente del lado sobre el cual incide la onda.
- La onda reflejada estará en fase con la incidente si  $Z_2 > Z_1$  y estará en contrafase si  $Z_2 < Z_1$ .
- No se producirá reflexión si  $Z_2 = Z_1$  y la presión de la onda transmitida coincidirá con la incidente.
- La onda transmitida está siempre en fase con la incidente.
- La presión de la onda transmitida es mayor que la incidente si  $Z_1 < Z_2$  y es menor en caso contrario.

- **Incidencia oblicua:**

Las ondas ultrasónicas responden a la ecuación de ondas del mismo modo que las ondas luminosas. Es por ello que, ante la incidencia oblicua de éstas en una superficie de discontinuidad, se producen fenómenos de reflexión y refracción.

Debido a que existen diversos modos de onda se producen fenómenos de conversión de modo, dando lugar en caso general a dos ondas reflejadas y dos transmitidas, como se presenta en la figura 3.6.



**Figura 3.6:** Esquema de la interacción de la onda con incidencia oblicua. [7]



Para la determinación de la dirección de propagación de las ondas transversales y longitudinales, tanto en el caso de reflexión como en el de transmisión, es aplicable la ley de Snell:

$$\frac{C_1}{\sin \alpha_1} = \frac{C_2}{\sin \alpha_2} \quad (3.10)$$

sustituyendo los valores de  $C_1, C_2, \alpha_1$  y  $\alpha_2$  con los valores adecuados.

Del análisis de esta fórmula se extraen las siguientes conclusiones:

- Las ondas incidente y reflejada de un mismo tipo forman el mismo ángulo con la normal.
- Los ángulos de refracción y reflexión de las ondas longitudinales serán siempre mayores que los respectivos de las ondas transversales, al ser la velocidad de propagación de éstas menor que la de las primeras.

Se definen una serie de ángulos críticos para los cuales alguno de los modos de onda desaparece en la reflexión o en la refracción:

- Para conseguir transmitir la onda únicamente en modo transversal, se impone la condición de que la onda longitudinal se refracte a  $90^\circ$ :

$$\sin \alpha_{iL} = \frac{C_{L1}}{C_{L2}}; \quad \sin \alpha_{iT} = \frac{C_{T1}}{C_{T2}} \quad \text{con} \quad C_{L1} \leq C_{L2}; \quad C_{T1} \leq C_{L2} \quad (3.11)$$

- Otra posibilidad es que las ondas transversales transmitidas formen  $90^\circ$ , dando lugar a una reflexión total:

$$\sin \alpha_{iL} = \frac{C_{L1}}{C_{L2}}; \quad \sin \alpha_{iT} = \frac{C_{T1}}{C_{T2}} \quad \text{con} \quad C_{L1} \leq C_{T2}; \quad C_{T1} \leq C_{T2} \quad (3.12)$$

- Para obtener una reflexión completa de una onda transversal en una longitudinal o al contrario:

$$\alpha_{iL} + \alpha_{rT} = 90^\circ; \quad \alpha_{iT} + \alpha_{rL} = 90^\circ \rightarrow \tan \alpha_{iL} = \frac{C_{L1}}{C_{T1}}; \quad \tan \alpha_{iT} = \frac{C_{T1}}{C_{L1}} \quad (3.13)$$

### Campo ultrasónico:

Los emisores de ultrasonidos presentan un tamaño finito por lo que, debido a fenómenos de difracción y al efecto de los bordes, la presión acústica presentará una serie de máximos y mínimos.

Se considerará, a continuación, un emisor circular. En este caso, la relación entre el diámetro del oscilador ( $D$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) da información sobre la posición de los máximos y mínimos, el número de éstos, la divergencia del haz ultrasónico y su diámetro.

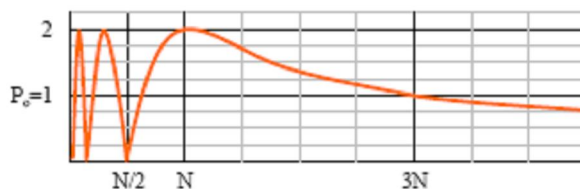
La presión acústica varía tanto en la dirección de propagación como en la dirección transversal, dando lugar a un haz ultrasónico dividido en tres zonas, como se muestra en la figura 3.7:

- *Campo cercano:* Dominado por fenómenos de interferencia, donde la presión acústica presenta máximos y mínimos hasta una distancia  $N$ , denominada longitud del campo cercano, que representa el último máximo y se define como:

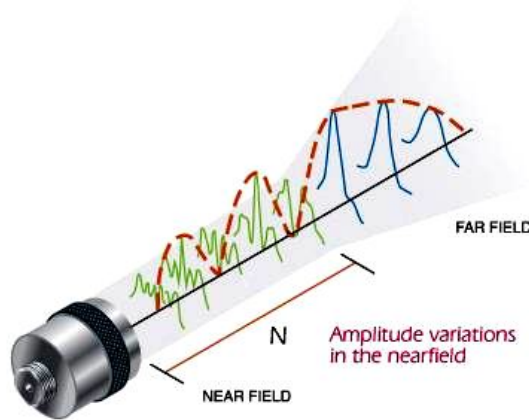
$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D^2}{4\lambda} \quad (3.14)$$

Esta distancia  $N$  del campo cercano representa el foco natural del palpador.

- *Zona de transición:* Que se extiende desde una distancia  $N$  hasta  $3N$ .
- *Campo lejano:* Para distancias mayores a  $3N$ .



**Figura 3.7:** Presión acústica a lo largo del eje de un oscilador. [7]



**Figura 3.8:** Vista en perspectiva del campo axial de presiones. [2]

La presión acústica según el eje del oscilador puede expresarse como:

$$P = P_0 2 \sin \frac{\pi}{\lambda} \left( \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + z^2} - z \right) \quad (3.15)$$

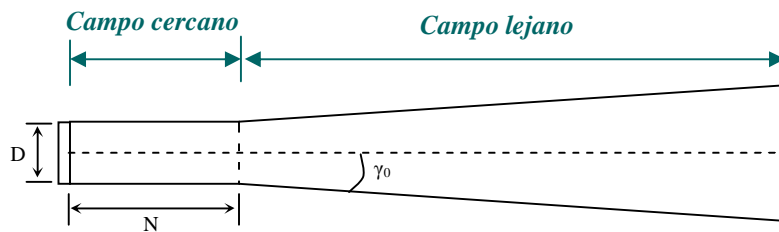
siendo  $P_0$  la presión acústica en la superficie del oscilador (en  $z=0$ ).

Esta expresión se simplifica para el campo lejano, resultando:

$$P = P_o \frac{S}{z\lambda} \quad (3.16)$$

donde  $S$  es la superficie del emisor.

La presión acústica sufre variaciones también según un eje transversal, de modo que esta variación se va suavizando a medida que la distancia al emisor crece, dando lugar a la divergencia del haz ultrasónico. Ver figura 3.9.



**Figura 3.9:** Haz ultrasónico simplificado. [6]

La divergencia del haz  $\gamma_0$  queda definida por:

$$\sin \gamma_0 = 1.2 \frac{\lambda}{D} \quad (3.17)$$

Como aproximación de trabajo, el haz de un palpador convencional no focalizado se imagina como una columna de energía originada por el área de elementos activos que se expande en diámetro y posteriormente comienza a disiparse, como se muestra en la figura 3.9.

Sin embargo, la forma real de haz es compleja, con gradientes de presión tanto en dirección axial como transversal, como se ha comentado. En la ilustración de la forma del haz que se presenta a continuación en la figura 3.10, el color rojo representa las áreas de mayor energía, mientras que el verde y el azul son las de energía más baja.



**Figura 3.10:** Áreas de energía del haz ultrasónico. [2]

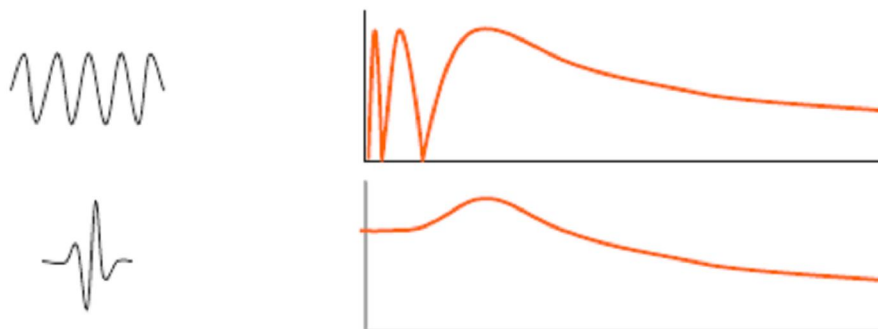
Cuando el palpador ya no es circular, sino rectangular de longitud  $L$  y anchura  $W$  (como se verá que es habitual en la tecnología Phased Array), el campo ultrasónico generado ya no es simétrico.

En este caso, la longitud del campo cercano puede calcularse con la fórmula:

$$N = \frac{kL^2}{4\lambda} \quad (3.18)$$

siendo  $k$  un factor de corrección en función de la relación  $W/L$ .

Como ya se ha visto, la zona del campo cercano presenta una sucesión de máximos y mínimos de presión acústica, que pueden falsear las indicaciones. Para evitarlo se utilizan impulsos de excitación cortos, uniformándose, de este modo, la presión acústica en el campo cercano. Ver figura 3.11.



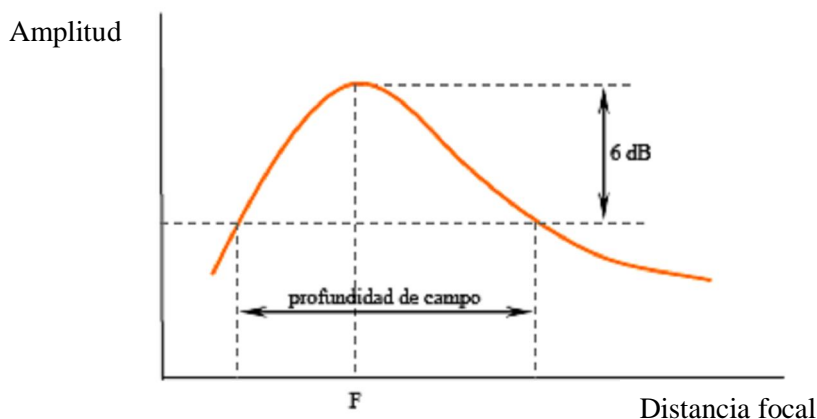
**Figura 3.11:** Campo acústico en función de la duración del impulso de excitación. [7]

### **Focalización del haz:**

La resolución lateral, esto es, la capacidad de diferenciar defectos próximos a la misma altura, depende de la apertura del haz ultrasónico. Del mismo modo, la capacidad de dimensionado de los defectos depende del diámetro del haz. Por esta razón es habitual modificar el campo acústico para reducir el diámetro del haz en la zona focal.

Esta focalización puede llevarse a la práctica mediante el empleo de lentes esféricas, cónicas o cilíndricas (o, como se verá más adelante, mediante control electrónico de la excitación en palpadores Phased Array).

Si se representa la presión acústica a lo largo del eje del haz, se obtiene la gráfica de la figura 3.12:



**Figura 3.12:** Presión acústica a lo largo del eje del haz. [7]





### **Eco devuelto por un reflector:**

Cuando una onda ultrasónica incide sobre un defecto, los puntos materiales de éste oscilan, pudiéndose considerar como un nuevo generador de ondas.

Se van a distinguir los casos de heterogeneidades de pequeño tamaño y de gran tamaño, estudiándose únicamente el caso de reflectores planos perpendiculares al haz.

- **Heterogeneidad de pequeño tamaño**

Según las fórmulas vistas anteriormente, la presión acústica generada por un oscilador en el campo lejano era proporcional a la presión en la superficie de éste. De esta forma, si se considera ahora el defecto como un generador de ondas, la presión acústica generada por éste en el campo lejano será proporcional a la presión acústica en su superficie.

Diferenciando las magnitudes relativas al oscilador con el subíndice “o” y las magnitudes relativas al defecto con el subíndice “d”, tendremos en la superficie del oscilador una presión de valor:

$$P = P_0 \frac{S_0}{a\lambda} \frac{S_d}{a\lambda} = P_o \frac{S_0 S_d}{a^2 \lambda^2} \quad (3.19)$$

- **Heterogeneidad de gran tamaño**

Cuando la heterogeneidad en estudio presenta un tamaño considerable, todo el haz queda dentro de ésta, detectando el receptor su propia presión acústica a una distancia aparente que es doble.

$$P = P_0 \frac{S_0}{2a\lambda} \quad (3.20)$$

### Atenuación:

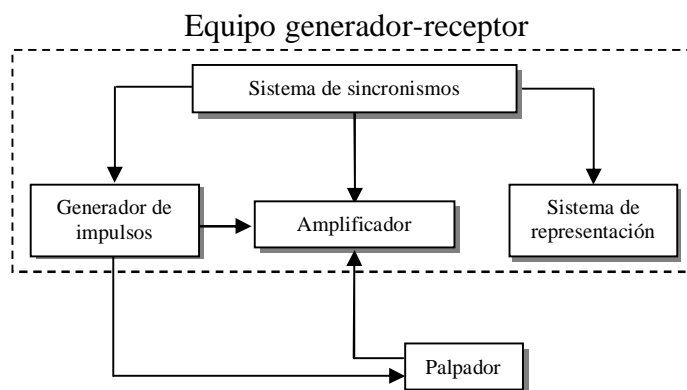
Hasta ahora no se han considerado pérdidas de energía de la onda durante su propagación. Sin embargo, en los materiales reales, esta pérdida de energía se produce por dos fenómenos, a saber:

- *Dispersión*: Debida a reflexiones en discontinuidades propias del material, como pueden ser los límites de grano en los metales o las superficies de la fibra en materiales compuestos. Esta dispersión es la causa del denominado “césped” de las señales ultrasónicas y, para disminuirla, es favorable la disminución de la frecuencia. Esto es así puesto que, a menor frecuencia, mayor es la longitud de onda, volviéndose así “invisibles” para la onda las discontinuidades de pequeño tamaño.
- *Absorción*: Disipación de energía elástica de la onda en calor.

## 3.2 EQUIPOS DE ULTRASONIDOS

Se denomina equipo de ultrasonidos al conjunto de sistemas electrónicos que, mediante la generación y recepción de ondas ultrasónicas, es capaz de mostrar una representación de las señales resultado del ensayo.

Un esquema básico de un equipo de ultrasonidos puede ser el mostrado en la figura 3.13:



**Figura 3.13:** Esquema típico de un equipo de ultrasonidos. [7]

La función de cada uno de los componentes del equipo de ultrasonidos es:

- *Sistema de sincronismos*: Genera la señal de sincronismo (frecuencia de repetición de impulsos) y la tensión de deflexión horizontal en sistemas con representación mediante tubo de rayos catódicos.
- *Generador de impulsos*: Encargado de generar impulsos eléctricos de alta energía.
- *Amplificador*: Controla la magnitud de la energía del impulso que llega al receptor.
- *Sistema de representación*: Transforma las señales eléctricas en visuales.
- *Palpador*: Encargado de emitir/recibir la señal ultrasónica al/del elemento a inspeccionar.

### 3.3 PALPADORES

---

Hasta ahora se ha hablado sobre la generación e interpretación de señales ultrasónicas, pero no se han tratado los elementos encargados de generarlas: los palpadores (figura 3.14).



**Figura 3.14:** Ejemplos de palpadores de ultrasonidos.

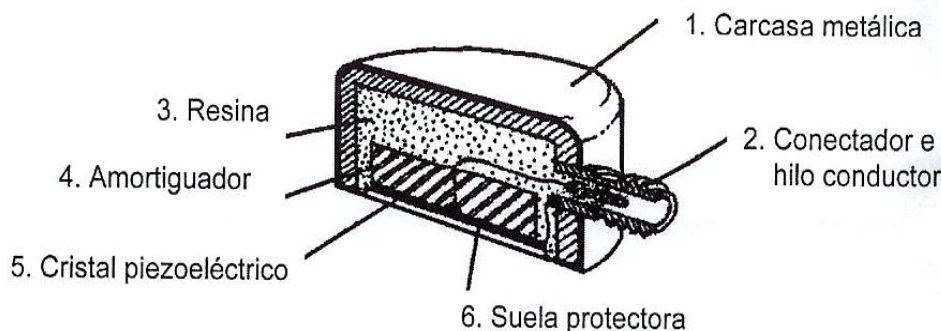
Aunque existan otros métodos de inducir una vibración ultrasónica en el interior de un material (magnetoestricción, láser, etc.), lo más habitual es valerse de cristales piezoeléctricos. Estos cristales reciben el nombre precisamente del fenómeno que les permite vibrar y, por tanto, generar las ondas ultrasónicas: la piezoelectricidad.

Este fenómeno es debido a la ausencia de centro de simetría de la celdilla unidad del cristal. Al aplicar una sollicitación mecánica a esta última, se produce un desequilibrio de cargas en la red, induciéndose una tensión eléctrica (efecto piezoeléctrico directo).

Análogamente, al aplicar una tensión eléctrica al cristal, varían las fuerzas internas de la red, generándose una deformación de ésta y la consiguiente deformación del cristal (efecto piezoeléctrico inverso).

Si la tensión que se le aplica al piezoeléctrico es alterna, el cristal se deformará de manera oscilante de acuerdo a la frecuencia de resonancia del cristal, la cual queda fijada por la velocidad del sonido en éste y su espesor:

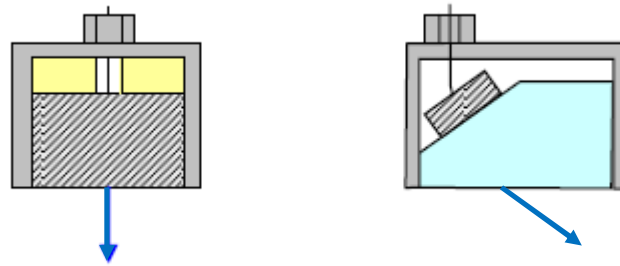
$$f_c = \frac{C}{2d} \quad (C: \text{velocidad acústica; } d: \text{espesor del cristal}) \quad (3.21)$$



**Figura 3.15:** Partes de un palpador. [6]

Un cristal piezoeléctrico logra la máxima eficacia cuando es excitado con su frecuencia característica. Si se excita a otra frecuencia, el cristal seguirá vibrando a su frecuencia característica pero con mucha menor amplitud. Normalmente se usan piezoeléctricos con frecuencia en torno a 5MHz para materiales compuestos.

Existen palpadores de incidencia normal y de incidencia oblicua, siendo los segundos los más usados en la inspección de soldaduras.



**Figura 3.16:** *Palpador de incidencia normal (izquierda) y de incidencia oblicua (derecha).* [7]

Para la inducción de vibraciones ultrasónicas en el interior del material no es suficiente con disponer de un palpador adecuado, sino que además se requiere un modo de acoplamiento que proporcione continuidad. Volviendo a las fórmulas del comportamiento de las ondas en las superficies límite, se llega a la conclusión de que la impedancia acústica óptima del medio acoplante es la media geométrica entre las impedancias acústicas de los dos materiales.

Existen dos tipos fundamentales de palpadores: los convencionales (de contacto y de inmersión) y los Phased Array, que son multielemento, y en los que se fundamenta el presente proyecto.

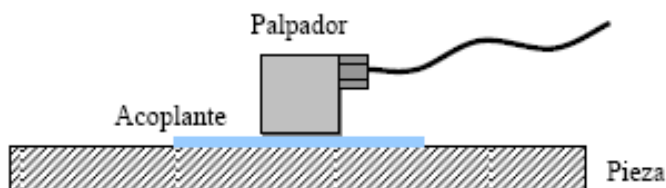
### 3.4 TÉCNICAS OPERATIVAS

---

De forma general, la inspección ultrasónica se puede clasificar en función del medio de acoplamiento como sigue:

- **Contacto:**

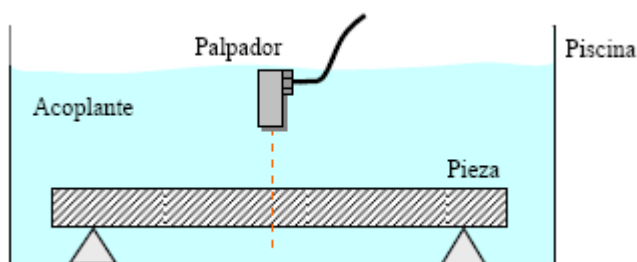
Cuando el palpador y la pieza se encuentran íntimamente unidos mediante una capa fina de acoplante, como aceite, grasa, gel, etc. (figura 3.17). De este modo, puede suponerse que la señal ultrasónica pasa directamente del palpador a la pieza y viceversa. El acoplante siempre es necesario, pues una pequeña capa de aire intermedia impediría la adecuada transmisión.



**Figura 3.17:** Configuración de un ensayo por contacto. [7]

▪ **Inmersión:**

Como ya se ha comentado, el medio de acoplamiento es siempre necesario, por lo que la inspección por contacto puede resultar problemática por falta de éste. Para evitar dicho problema, se recurre a los ensayos por inmersión, generalmente en agua (figura 3.18), con lo que se garantiza la existencia de un medio acoplante de forma continua.



**Figura 3.18:** Configuración de un ensayo por inmersión. [7]

En este caso, la pieza se sumerge en una piscina que contiene el medio acoplante (normalmente agua) y el palpador se sitúa a una cierta distancia de la superficie de la pieza, eliminando además la posibilidad de causar daños en ésta debido al rozamiento con el palpador.

▪ **Chorro de agua:**

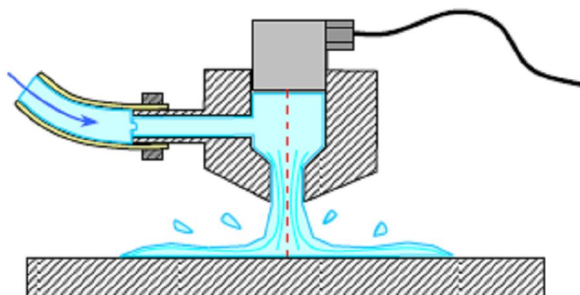
El hecho de realizar los ensayos por inmersión resulta siempre problemático por varias razones:

- Se requiere una piscina de dimensiones consideradas
- Necesidad de una desgasificación del agua
- La existencia de burbujas bajo la pieza puede influir en la señal obtenida
- Ciertos componentes pueden deteriorarse al ser sumergidos

Para evitar estos problemas se suele recurrir al chorro de agua, en los que el medio de acoplamiento se dirige a través de una boquilla en la que se encuentra instalado el palpador (figura 3.19). De este modo, se consigue un adecuado acoplamiento, con menores cantidades de agua.

En este caso se requieren:

- Depósito y circuito de agua
- Desgasificación del agua
- Régimen laminar para evitar burbujas y cambios de presión



**Figura 3.19:** Configuración de un ensayo por chorro de agua. [7]

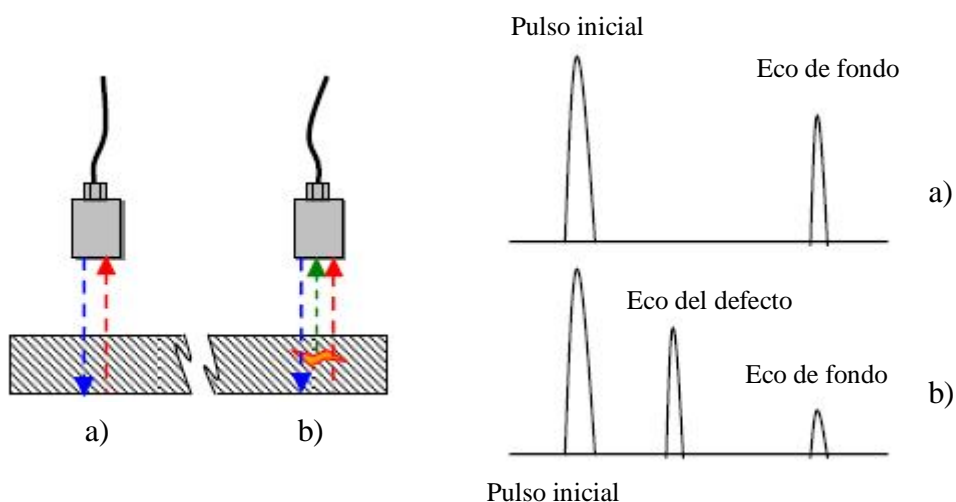
#### ○ **TÉCNICAS DE INSPECCIÓN:**

Otro tipo de clasificación de los métodos de inspección ultrasónica es en función de la indicación utilizada, distinguiéndose:

### **Pulso eco:**

Esta técnica consiste en emitir la señal ultrasónica en el interior del espécimen de ensayo para evaluar su estado en función de las reflexiones que se produzcan en su interior. Cuando se dispone de una pieza sin defectos (figura 3.20.a), la señal se propaga sin interrupciones hasta la cara opuesta, en la cual se refleja. La señal reflejada constituye el denominado eco de fondo, que aparece a una distancia proporcional al espesor del componente. Al encontrarse con un reflector intermedio, parte de la señal se reflejará y parte lo atravesará en función de las características de éste. Aparecerá, por tanto, un eco intermedio indicando la presencia de un defecto (figura 3.20.b).

Mediante esta técnica se podrá determinar la profundidad de los defectos en función de la posición en que aparezcan los ecos intermedios, así como el tipo de defecto con la información tanto del eco de fondo como de los ecos intermedios (ver capítulo 6, apartado 6.2).

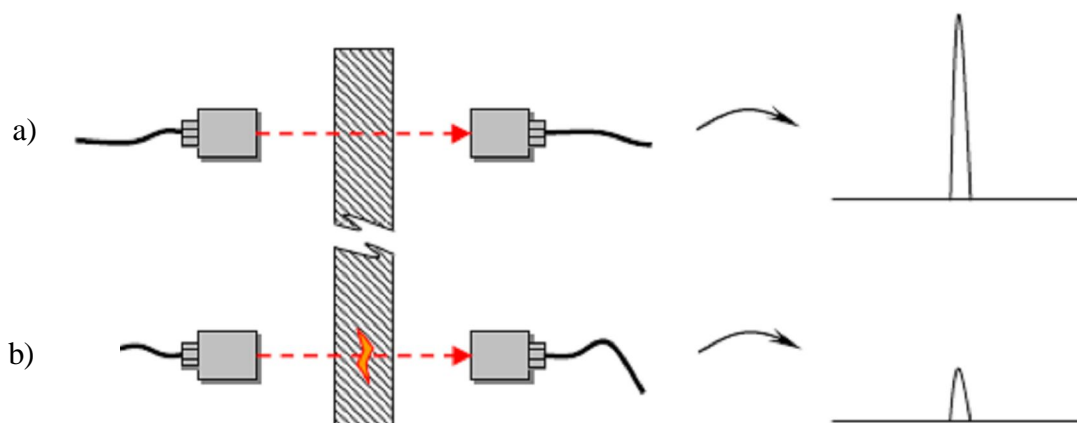


**Figura 3.20:** Esquema de un ensayo por pulso eco. Pieza sin defecto (a), pieza con defecto (b). [7]

### **Transmisión:**

Consiste en transmitir una señal ultrasónica que atraviesa el espécimen de ensayo, recibiendo por la cara opuesta con otro transductor (figura 3.21). De este modo, cuando aparece un defecto, éste puede ser detectado en base a la atenuación de la señal recibida.



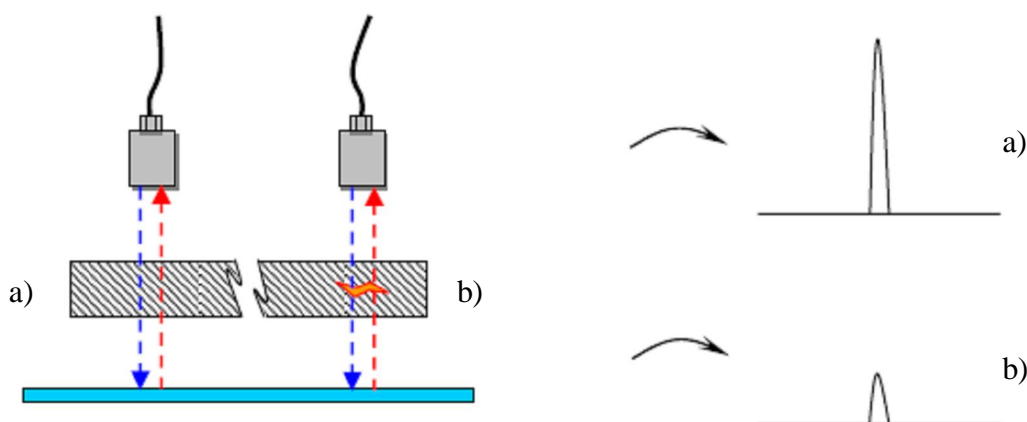


**Figura 3.21:** Esquema de un ensayo por transmisión. Pieza sin defecto (a), pieza con defecto (b). [7]

Esta técnica permite la detección de los defectos, pero no determinar de qué tipo es ni a qué profundidad se encuentra, ya que sólo se dispone de información de atenuación. Por esta razón, la evaluación de los defectos debe ser complementada generalmente con otra técnica (pulso-eco).

### **Placa reflectante:**

Se trata de emitir una señal ultrasónica de modo que atraviese la pieza y se refleje en una superficie adecuada (placa), de forma que, en su camino de vuelta, la señal atraviesa de nuevo la pieza y es detectada con el mismo transductor (figura 3.22).



**Figura 3.22:** Esquema de un ensayo por placa reflectante. Pieza sin defecto (a), pieza con defecto (b). [7]

Al igual que ocurría con el método de transmisión, mediante esta técnica no se puede determinar la profundidad de los defectos ni la clase de éstos, y su evaluación debe ser complementada por la técnica de pulso-eco.

### 3.5 MODOS DE REPRESENTACIÓN

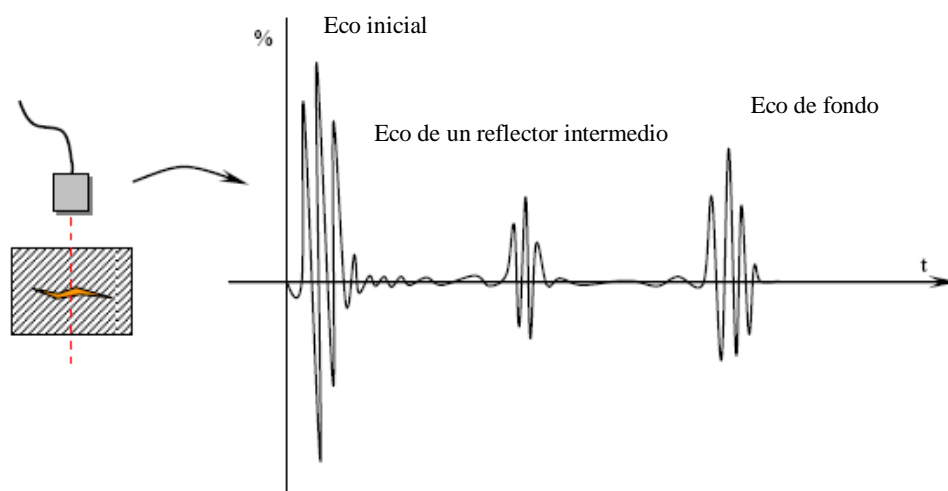
Para llevar a cabo la evaluación de las señales ultrasónicas, éstas deben presentarse al inspector de alguna forma fácilmente interpretable.

En las técnicas de inspección ultrasónica se suelen utilizar tres tipos de representación, los cuales se describen a continuación:

- **A-Scan:**

Se representa la amplitud de la señal ultrasónica, en porcentaje o en dB, en función del tiempo de vuelo (figura 3.23).

Esta representación permite determinar la profundidad a la que se encuentran los reflectores (posibles defectos) y su naturaleza en función de la amplitud de las indicaciones de éstos y del eco de fondo.

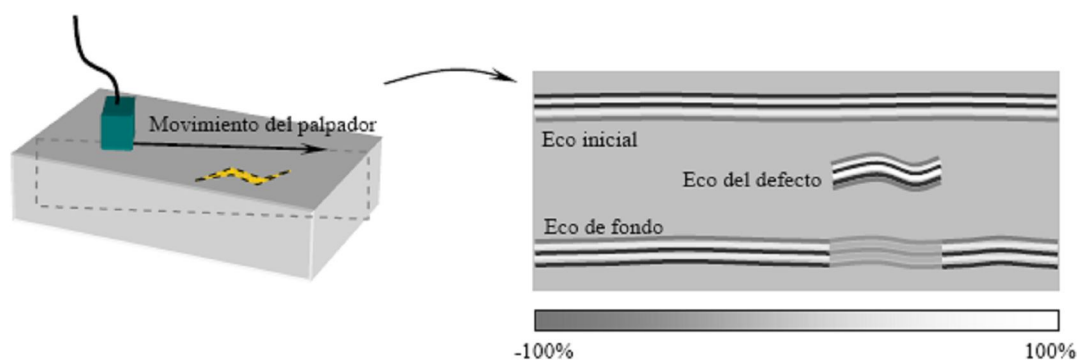


**Figura 3.23:** Representación A-Scan con la señal de radiofrecuencia (RF). [7]

Con esta presentación de datos sólo se puede conocer el estado de la pieza en el punto sobre el cual se sitúa el palpador en cada momento.

- **B-Scan:**

Esta representación (figura 3.24) se forma con la información proporcionada por múltiples A-Scans a lo largo de una línea, presentando el perfil del espesor de la pieza en la zona de inspección. Se asigna un índice de una tabla de colores a cada amplitud de los A-Scan, formándose una imagen bidimensional en tiempo y posición. Gracias a este modo de representación se puede determinar la posición de los defectos, así como su caracterización.

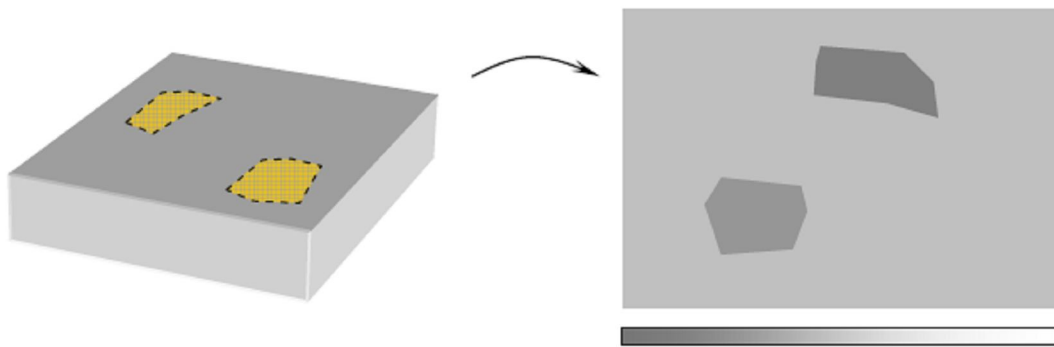


**Figura 3.24:** Representación B-Scan. [7]

- **C-Scan:**

En este caso, se representa en forma bidimensional la amplitud de las indicaciones seleccionadas, de forma que puede conocerse la posición de los defectos en dos dimensiones.

El C-Scan (figura 3.25) proporciona información sobre el estado de la pieza en todos los puntos en que ésta ha sido inspeccionada. Permite representar los datos de amplitud de las indicaciones o de la profundidad mediante la asignación de índices de escalas gráficas.



**Figura 3.25:** *Representación C-Scan.* [7]

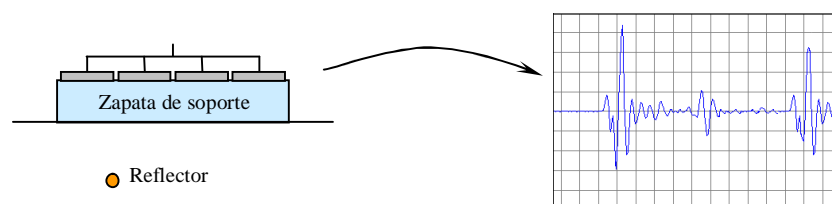
## CAPÍTULO 4

# TECNOLOGÍA PHASED ARRAY EN EL CAMPO DE LOS ULTRASONIDOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

---

La inspección de componentes de gran tamaño mediante la tecnología ultrasónica convencional supone un coste de tiempo bastante elevado. Para tratar de optimizar el proceso se han desarrollado sistemas multipalpador, de tal manera que la región inspeccionada por unidad de tiempo se reduce de forma considerable. Los primeros desarrollos consistieron en palpadores con múltiples cristales piezoeléctricos en paralelo (figura 4.1), de modo que se conseguía generar un haz de anchura considerable. Sin embargo, la electrónica de emisión y recepción disponía de un único canal, de forma que si se detectaba un defecto no podría conocerse su posición.



**Figura 4.1:** *Palpador de cristal múltiple en paralelo.* [7]

Un paso más adelante en la evolución de los sistemas multipalpador consistió en separar la electrónica asociada a cada piezoeléctrico, permitiendo recibir las señales de cada cristal de forma independiente, pero manteniendo un único generador de impulsos. De esta forma se consiguió generar un haz ultrasónico ancho pudiendo, sin embargo, detectar la posición de los reflectores. Finalmente, pudo separarse por completo la electrónica de emisión y recepción de

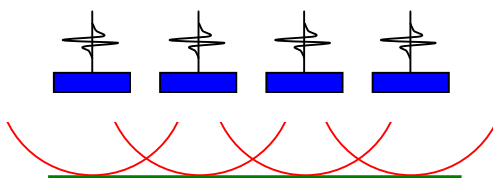
cada cristal, siendo éste el caso de los sistemas de inspección multipalpador usuales en los que se dispone de un cabezal con varios palpadores individuales. En estos equipos, cada uno de los palpadores emite un haz ultrasónico propio y recibe los ecos de las discontinuidades con los que éste interacciona.

Si la superficie activa (apertura) se divide en múltiples elementos piezoeléctricos de reducido tamaño, cada uno de los cuales es conducido por un emisor-receptor independiente, el sistema podría operar de un modo distinto, dando lugar a la *tecnología Phased Array* que se introducirá en este capítulo. Esta tecnología ha sido empleada de forma intensiva en campos como, por ejemplo, la generación y recepción de señales de radar. En este caso, en lugar de una única antena se utiliza un conjunto de ellas, de forma que, alimentándolas con las señales desfasadas entre sí, se consigue radiar la energía en la dirección deseada. La aplicación actual en la generación y recepción de ondas ultrasónicas es equivalente, utilizando los transductores adecuados.

## 4.2 FUNDAMENTO DE LA TECNOLOGÍA PHASED ARRAY

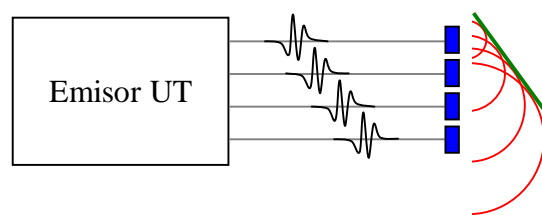
---

Se considera un palpador constituido por un número elevado de elementos piezoeléctricos, cada uno de los cuales puede ser excitado de forma independiente. Se supone además que las propiedades de cada cristal son iguales, lo cual no está demasiado alejado de la realidad debido a que estos cristales se obtienen tras el corte de una misma oblea. Si estos cristales son estimulados al mismo tiempo, la interferencia de las ondas ultrasónicas generadas dará lugar a un frente de ondas *plano* (figura 4.2).



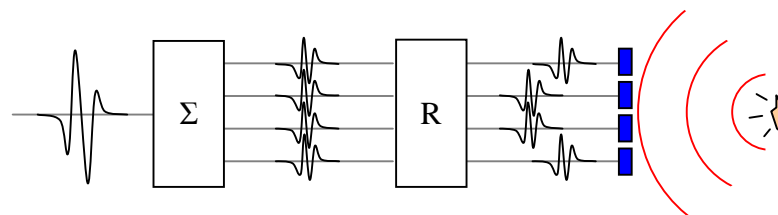
**Figura 4.2:** Generación de un frente de ondas plano mediante múltiples osciladores operando de forma simultánea. [7]

Si se dispone de la electrónica necesaria, será factible excitar los elementos en instantes de tiempo distintos de forma precisa, dando lugar a un fenómeno de interferencia constructiva en ciertos puntos y destructiva en otros. En aquellos puntos donde exista coincidencia de fase, la presión acústica será mayor, sucediendo lo contrario en las zonas en contrafase. De este modo, controlando de manera adecuada los *retardos* de excitación (figura 4.3), se puede generar un haz ultrasónico similar al obtenido con palpadores convencionales, pero configurable en distancia focal y dirección de propagación.



**Figura 4.3:** Configuración de un haz ultrasónico mediante la aplicación de retardos en la excitación. [7]

El proceso de recepción (figura 4.4) se lleva a cabo de forma inversa: el haz ultrasónico incide sobre una discontinuidad, la cual puede suponerse en ese instante como un nuevo generador de ondas (Principio de Huygens). Durante la fase de recepción, las ondas generadas en la discontinuidad se propagan hasta los distintos elementos del transductor, recorriendo diferentes caminos. Las respuestas de los piezoelectricos son capturadas y, tras aplicar un retardo adecuado para compensar los tiempos de vuelo, se adicionan dando lugar a una suma coherente, gracias a la cual se mejora la relación señal-ruido.



**Figura 4.4:** Proceso de recepción de la señal mediante la aplicación de retardos. [7]

Por regla general, un palpador Phased Array se compone de un número muy elevado de elementos activos (del orden del centenar), de modo que si éstos operasen al mismo tiempo de la forma anteriormente descrita, los requerimientos de hardware serían prohibitivos hoy en día

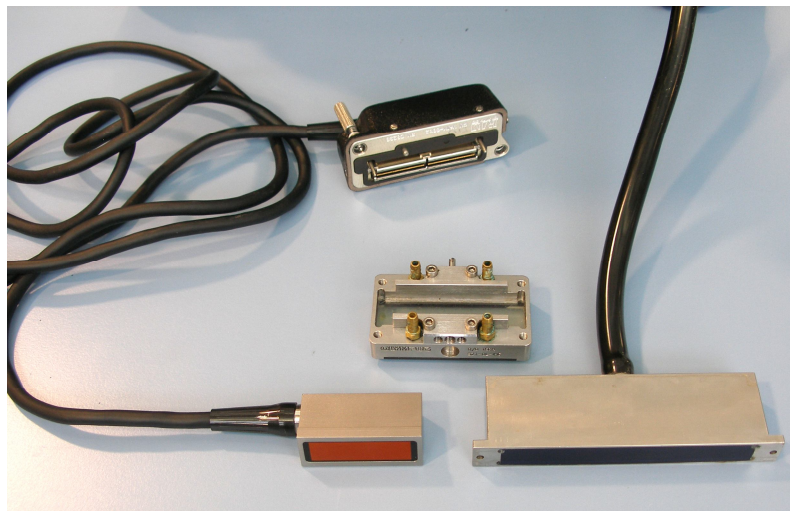
desde un punto de vista económico, pues sería necesario disponer de tantos emisores/receptores de ultrasonidos como elementos tenga el palpador.

Por ello, la forma usual de operación consiste en seleccionar, mediante un multiplexor, un número reducido de elementos (normalmente no más de 32) sobre los cuales actuarán los emisores/receptores de ultrasonidos disponibles. Para operar de este modo con todos los elementos que conforman el Array bastará con programar el multiplexor para seleccionar distintos grupos de elementos cada vez, realizando así un *barrido electrónico*.

### 4.3 CONCEPTOS BÁSICOS

A continuación se definirán algunos términos relacionados con la tecnología Phased Array, en concreto de los palpadores, que se utilizarán repetidamente a lo largo del proyecto:

- **Cantidad de elementos (N):** Es el número total de transductores que componen el palpador Phased Array. Los números de elementos habituales en estos palpadores son: 24, 32, 64 y 128.

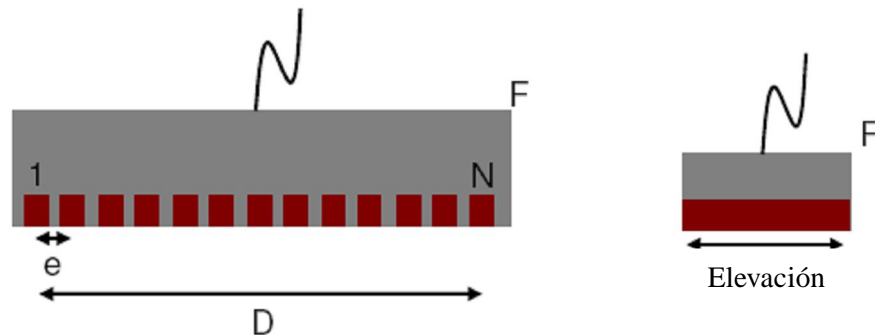


**Figura 4.5:** Palpadores Phased Array de 64 elementos (izda.) y 128 (dcha.), y zapata de PMMA.

- **Pitch (e):** Distancia entre centros de dos elementos consecutivos.

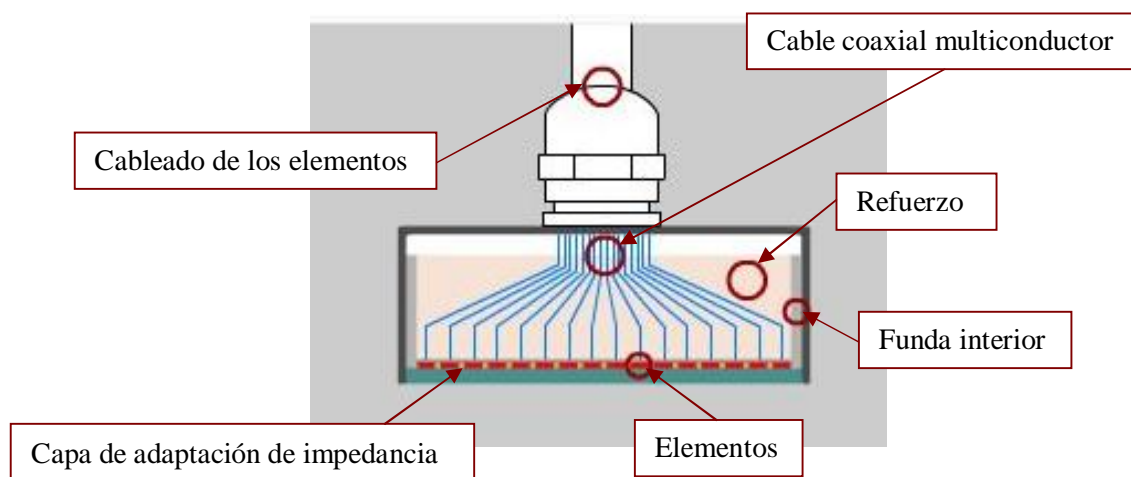


- **Apertura (D):** También llamado diámetro de la fuente, viene determinado por la relación entre el número de elementos (N) y la distancia entre los mismos (e). Típicamente se denomina apertura al número de elementos excitados en una secuencia. Ver figura 5.1.
- **Elevación:** Ancho de un elemento individual.
- **Palpador virtual:** El número de elementos pulsados simultáneamente para crear un grupo activo.



**Figura 4.6:** Representación esquemática de un palpador Phased Array (izq.) y uno monoelemento (dcha.) [9]

Por otro lado, en la figura 4.7 se presenta la sección interior de un palpador Phased Array donde se pueden apreciar las diferentes partes por las que están compuestos:



**Figura 4.7:** Sección de un palpador Phased Array. [2]

Además de estos términos referentes a los palpadores Phased Array, otros conceptos habituales relacionados con esta tecnología son:

- **Elemento:** Cristal piezoeléctrico aislado físicamente de otros y con sus propias conexiones para la emisión/recepción (figura 4.8).



**Figura 4.8:** Representación de los diferentes elementos que componen un palpador Phased Array. [7]

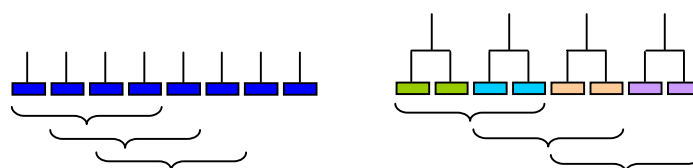
- **Canal:** Conjunto de elementos que van a operar de forma conjunta como si se tratara de uno solo, es decir, un grupo de piezoeléctricos con una sola vía de emisión/recepción (figura 4.9). Un elemento es un caso particular de canal.



**Figura 4.9:** Representación de un ejemplo de canales en un palpador Phased Array. [7]

La utilización de canales de más de un elemento se justifica en los casos en que la energía a emitir sea elevada, por lo que se requiere el máximo número de piezoeléctricos. Si el equipo a utilizar dispone únicamente de  $X$  vías de emisión/recepción independientes, sólo se podrán usar más de  $X$  elementos si los agrupamos en canales, de modo que con canales de  $Y$  elementos y la misma electrónica estaremos emitiendo/recibiendo simultáneamente con  $X \cdot Y$  cristales.

- **Secuencia o grupo:** Conjunto de elementos o canales que se estimulan conjuntamente de acuerdo a una ley de retardos establecida (figura 4.10). Un mismo elemento puede pertenecer a más de una secuencia.



**Figura 4.10:** Representación de un ejemplo de secuencias o grupos en un palpador Phased Array. [7]



- **Apertura activa:** Es el número de elementos que compone cada grupo.
- **Apertura total:** Es el número de elementos sobre los que se lleva a cabo el barrido electrónico.
- **Ley de excitación o ley focal:** Serie de retardos con los que se aplican los impulsos de excitación en la emisión y con los que se corrigen las señales en recepción para efectuar la suma coherente. Estas leyes se calculan para conseguir formar un haz focalizado y/o direccionado.
- **Barrido electrónico:** Consiste en desplazar la apertura activa a lo largo de todo el transductor, excitando grupos bien consecutivos, o bien no consecutivos, con la ayuda de un multiplexor.

Muchos de estos conceptos serán desarrollados con más detalle en los sucesivos capítulos del presente proyecto, sin embargo se ha decidido introducirlos aquí para hacer referencia a ellos con anterioridad.

#### 4.4 ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE UN SISTEMA PHASED ARRAY

---

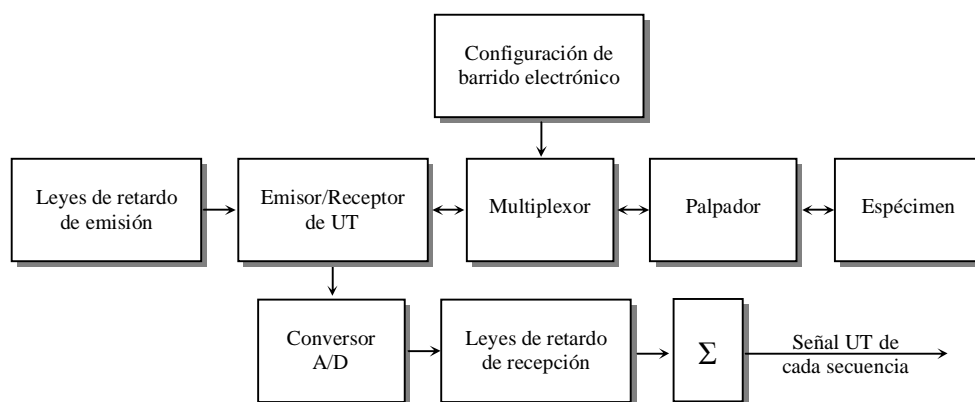
Para implementar un sistema de inspección ultrasónica basado en la tecnología Phased Array se requiere una serie de sistemas característicos que se analizan a continuación:

- **Palpador Phased Array:** Es el transductor que transforma las señales eléctricas de excitación en ondas ultrasónicas, así como la transformación inversa. Se compone de múltiples cristales piezoeléctricos aislados y con distintas conexiones, de modo que son operables de forma independiente (ver figura 4.5).
- **Multiplexor:** Componente electrónico para seleccionar los canales sobre los que se va a actuar.



- **Emisor/receptor de ultrasonidos (UT):** Equipo encargado de la generación de las señales eléctricas de excitación y de la recepción de las señales de respuesta del transductor. Se diferencian de los equipos convencionales en que disponen de varios canales de emisión/recepción simultáneos.
- **Convertor analógico/digital:** Debido a la necesidad de realizar la suma de las señales recibidas por cada canal que compone un grupo, se requiere transformar las señales analógicas en sus equivalentes digitales permitiendo así, además, su almacenamiento en soportes electrónicos.
- **Sistema de cálculo de leyes de retardo:** La configuración del haz ultrasónico se consigue mediante la aplicación de las señales de excitación en forma desfasada. Se requiere, por tanto, un sistema de cálculo de los desfases necesarios para la obtención de dicha configuración. Normalmente se trata de un ordenador en el cual se realizan también las evaluaciones y se almacenan los datos.
- **Sistema de representación de resultados y evaluación:** Suele tratarse del mismo equipo de cálculo de las leyes de retardo, y se encarga de transformar y presentar las señales obtenidas para facilitar su evaluación.

De esta manera, la tecnología Phased Array funciona de acuerdo con el esquema de la figura 4.11:



**Figura 4.11:** Esquema de funcionamiento de la tecnología Phased Array. [7]



El emisor de ultrasonidos (UT) aplica los impulsos de excitación al palpador conforme a las leyes de retardo de emisión a través del multiplexor, el cual opera según la configuración del barrido electrónico. El haz ultrasónico así generado tendrá la dirección y distancia focal deseada, y dará lugar a unos ecos de respuesta en su interacción con la pieza a examen. Estos ecos son transformados de nuevo en señales eléctricas en el palpador y muestreados para obtener una representación digital equivalente. Por último, aplicando los retardos de recepción adecuados se produce una suma coherente, proporcionando una señal única por cada grupo de elementos. A partir de este punto, la interpretación de las indicaciones de cada secuencia es totalmente equivalente a la realizada con las técnicas ultrasónicas convencionales.

## **4.5 VENTAJAS DE LA UTILIZACIÓN DE LA TECNOLOGÍA PHASED ARRAY**

---

Ahora que ya se tiene una cierta idea del fundamento de la inspección por ultrasonidos y la tecnología Phased Array, se pueden comenzar a entender las ventajas que ésta ofrece. En este apartado se explican algunos beneficios que ya se vislumbran de la utilización de esta tecnología.

### **4.5.1 VELOCIDAD DE INSPECCIÓN**

Si se compara con una inspección realizada con un palpador simple convencional, el tiempo necesario para barrer una gran pieza se ve drásticamente reducido (disminución de los tiempos de inspección), principalmente gracias a que, en lugar de examinar líneas de aproximadamente 2 ó 3 mm de ancho, el ancho de barrido aumenta hasta unos 50 ó 100 mm en un palpador Phased Array. Igualmente, existe un incremento entre líneas de barrido que pasan de 1 y 3 mm con un palpador convencional, hasta entre 50 y 100 mm con un palpador Phased Array. Así que, a pesar de que se necesite más tiempo para adquirir y tratar los datos de una pasada, queda sobradamente compensado por la reducción del número de pasadas necesarias para realizar el barrido. Como ejemplo, para inspeccionar un panel de 600 x 600



mm se necesitan, en las mismas condiciones, 55 minutos empleando un palpador convencional y 3 minutos con la tecnología Phased Array.

En cambio, si se compara el tiempo de barrido que necesita un cabezal multipalpador convencional con el que necesita un cabezal Phased Array, resulta que la diferencia prácticamente desaparece. Esto es así debido a que el cabezal multipalpador también tiene un considerable ancho de barrido y a que la velocidad a la que se desplaza el cabezal (unos 600 mm/s) es superior a la velocidad de un palpador Phased Array (en torno a 200 mm/s). A pesar de esto, es preferible utilizar cabezales de Phased Array por el motivo que se analiza a continuación.

#### **4.5.2 COBERTURA DE BARRIDO**

El principal problema que presentan las inspecciones mediante multipalpador reside en su inconsistencia cerca de los bordes de la pieza o cerca de los radios de curvatura. Por este motivo, tras realizar una inspección automática se suele tener que analizar las zonas problemáticas mediante otro modo (comúnmente, inspección ultrasónica manual) lo que produce un importante aumento del trabajo y el tiempo necesarios para evaluar el componente.

Sin embargo, gracias a la capacidad de los palpadores Phased Array para dirigir y focalizar el haz, las zonas próximas a los radios de curvatura o a bruscas variaciones geométricas (rampas, cambios de espesor, etc.) pueden ser inspeccionadas utilizando unas apropiadas leyes de retardo. De esta manera se disminuye el área que debe ser inspeccionada posteriormente mediante otros modos. Con esta propiedad también se salva otro de los problemas de las inspecciones convencionales, aquél que radica en que la distancia focal es sólo función de la velocidad acústica del material estudiado. Debido a esto se necesitarán palpadores de distintos diámetros y espesores para poder medir tan cerca como sea posible de esta profundidad óptima de inspección, que variará en cada pieza e incluso en cada zona de la pieza.

### 4.5.3 NUEVOS MODOS DE EVALUACIÓN EN TIEMPO REAL

Los palpadores convencionales permiten observar el A-Scan correspondiente a la posición del palpador, donde los ecos aparecen como picos distribuidos a lo largo del eje de abscisas, que representa la profundidad. Sin embargo, con los palpadores Phased Array, y gracias a su capacidad de realizar barridos electrónicos, es factible observar también el B-Scan en tiempo real de la sección sobre la que está colocado el palpador, además de los A-Scan que corresponden a cada secuencia usada en el barrido. El B-Scan resulta bastante más gráfico que el A-Scan y ofrece una información más fácil de interpretar para el inspector sobre el tamaño, la forma y la profundidad del defecto.

Otro de los nuevos modos de evaluación se obtiene gracias a la capacidad de direccionamiento del haz: el *S-Scan* (Sector Scan, figura 4.12). Gracias a él se pueden estudiar con más fiabilidad zonas como aquéllas que tienen la pared de fondo inclinada.

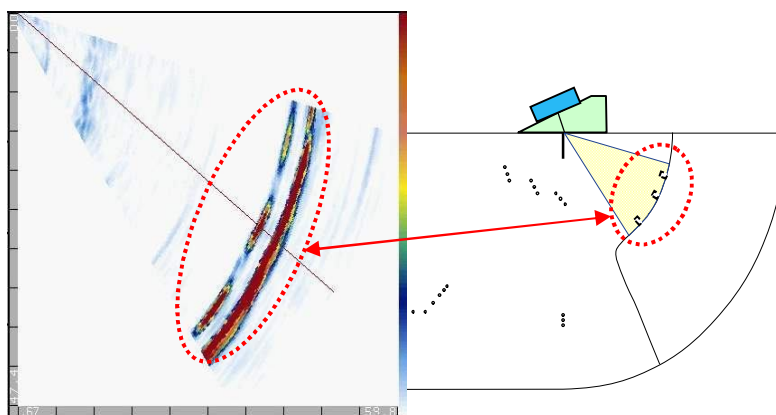


Figura 4.12: Representación S-Scan. [8]

### 4.5.4 FLEXIBILIDAD

En el mercado de palpadores convencionales se pueden hallar infinidad de geometrías y configuraciones para poder cubrir toda la variedad de casos que pueden surgir. Existen palpadores de distintos diámetros y espesores para medir a diferentes profundidades, los hay



de incidencia normal y oblicua, como ya se explicó en el capítulo 3, y también algunos con zapatas de extrañas geometrías para estudiar zonas como radios de curvatura.

La tecnología Phased Array permite sustituir todos estos palpadores por un solo transductor. Aplicando la correspondiente ley de excitación se podrá dirigir, enfocar y, en general, manipular el haz ultrasónico, pudiéndose adaptar a las necesidades específicas de cada inspección.

#### 4.5.5 GEOMETRÍAS COMPLEJAS

Las posibilidades que ofrece la tecnología Phased Array, además de reducir el número de palpadores necesarios para inspeccionar, permite estudiar piezas de geometrías complejas.

Estas piezas, que suponen un reto a la hora de ser analizadas mediante palpadores convencionales, podrán ser examinadas definiendo una adecuada ley de excitación. El cálculo de dicha ley será más o menos complejo en función de la modificación que se desea aplicar al haz, pero en la mayoría de los casos bastará con aplicar una ecuación con los valores deseados, que se definen en función de su posición sobre la pieza.

#### 4.5.6 OTRAS VENTAJAS

- **Control electrónico del sistema:** Una vez ajustados los parámetros de un determinado ensayo, se archiva el fichero de configuración correspondiente para su posible utilización en sucesivas inspecciones.
- **Inspección de zonas antes no accesibles,** gracias a la posibilidad de fabricar palpadores de reducidas dimensiones que pueden emplearse para inspeccionar regiones sin movimiento físico de éste.





## 4.6 LIMITACIONES DE LA TECNOLOGÍA PHASED ARRAY

---

Sin embargo, no todo son ventajas en la tecnología Phased Array, pudiéndose distinguir algún inconveniente:

- **Coste elevado de los equipos:** Los equipos e instalaciones necesarias para el empleo de esta técnica suponen una inversión económica considerable en comparación con los sistemas tradicionales.
- **Reducida experiencia en su utilización,** al contrario de lo que ocurre con las técnicas convencionales.
- **Poca literatura específica:** tratándose, en muchos casos, de aplicaciones en el campo de la medicina, no directamente extrapolables a los ensayos no destructivos.

A pesar de los inconvenientes expuestos, se aprecia que éstos no son propios de la tecnología, sino de la etapa de desarrollo en la que ésta se encuentra.

Así, es de esperar que el coste de los equipos disminuya con el incremento de su utilización, el cual derivará en el establecimiento de una base de conocimientos técnicos y operativos que llegará a ser comparable algún día a la de los métodos ultrasónicos convencionales.



## CAPÍTULO 5

### PALPADORES PHASED ARRAY

#### 5.1 TIPOS DE PALPADORES PHASED ARRAY

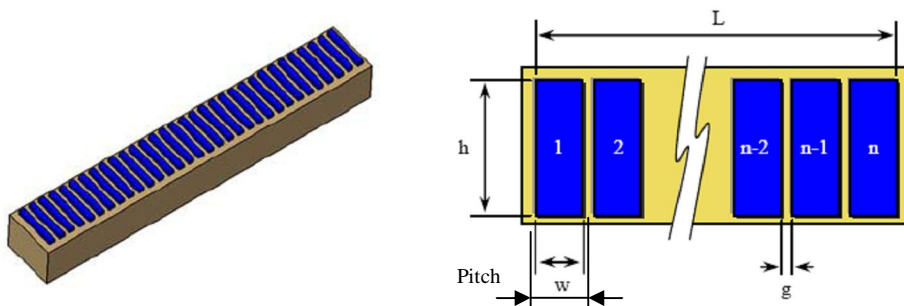
Dependiendo de la distribución geométrica de los elementos que componen un palpador se tendrán distintas posibilidades de actuación de éste. En función de qué tipo de ensayo se desee realizar, habrá que seleccionar el palpador más adecuado.

En el mercado se pueden encontrar las distintas configuraciones que a continuación se describen:

##### 5.1.1 1-D o LINEALES

Estos palpadores son los que están mayormente implantados debido a su facilidad de fabricación y simplicidad de operación; sin embargo, presentan actuaciones limitadas.

Están formados por una serie de elementos piezoeléctricos rectangulares de dimensiones  $h \times w$ , distribuyéndose linealmente (figura 5.1). Normalmente se presentan en configuraciones de 16, 24, 32, 64 ó 128 elementos, pero no suelen excitarse de forma conjunta más de 32 elementos debido a la complejidad del hardware que esto requeriría.



**Figura 5.1:** Esquema de un palpador Phased Array lineal. [7]



La ventaja principal de este tipo de palpadores es que, mediante barridos electrónicos, puede sustituirse el movimiento en un eje en inspecciones automáticas o el movimiento manual en su contra, incrementando la velocidad de inspección en, al menos, un orden de magnitud.

Con una adecuada excitación, estos palpadores permiten:

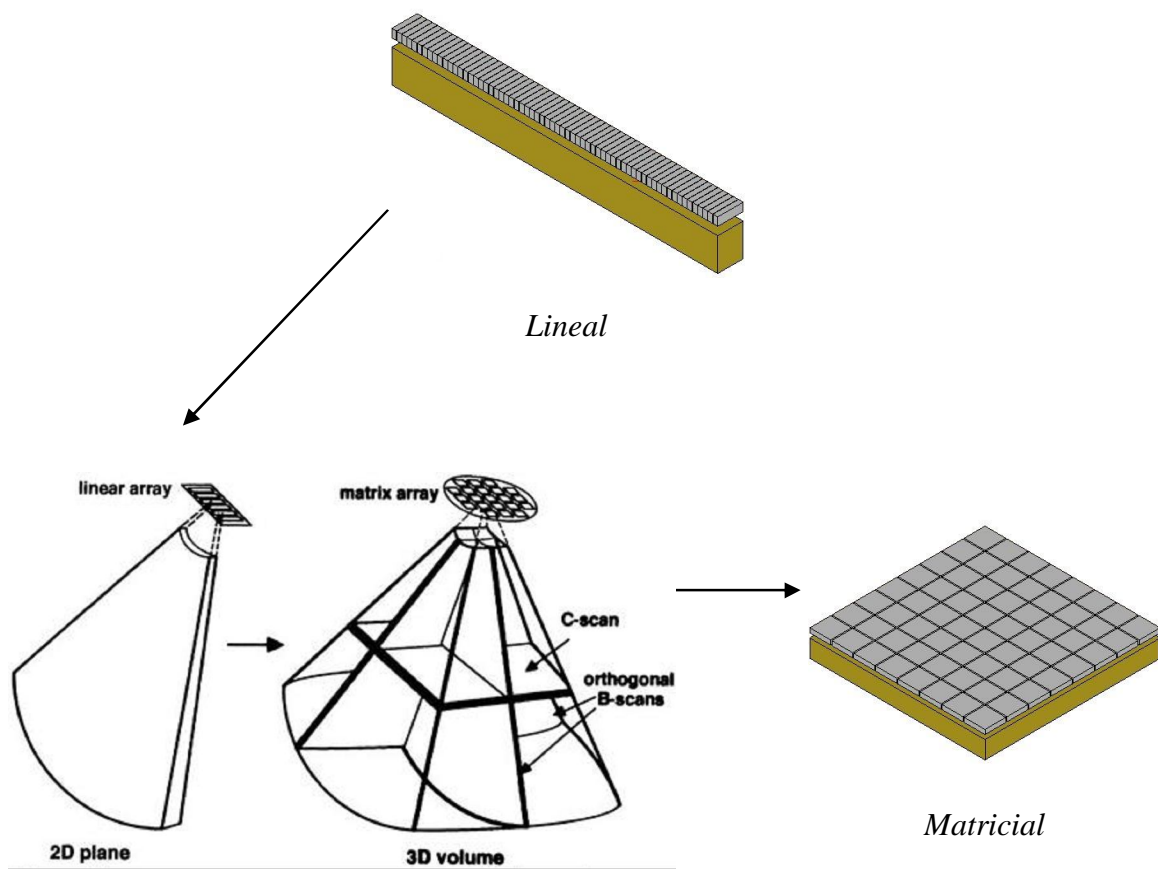
- *Deflexión del haz ultrasónico*: siempre dentro del plano de inspección.
- *Focalización*: siempre dentro del plano de inspección.
- *Barrido electrónico*: Implica que, activando y desactivando los canales necesarios, el multiplexor evita tener que desplazar el cabezal, lo cual permite, entre otras cosas, tener una representación B-Scan en tiempo real de la sección que está justo debajo del palpador. Como contrapartida tiene que estas operaciones sólo se pueden realizar en el plano que contiene los elementos piezoeléctricos.

Este proyecto se centrará en la evaluación de palpadores Phased Array únicamente lineales. No obstante, a continuación se dedica un subapartado a la descripción del resto de tipos de palpadores Phased Array que se emplean en la inspección no destructiva por ultrasonidos.

### 5.1.2 OTRAS GEOMETRÍAS

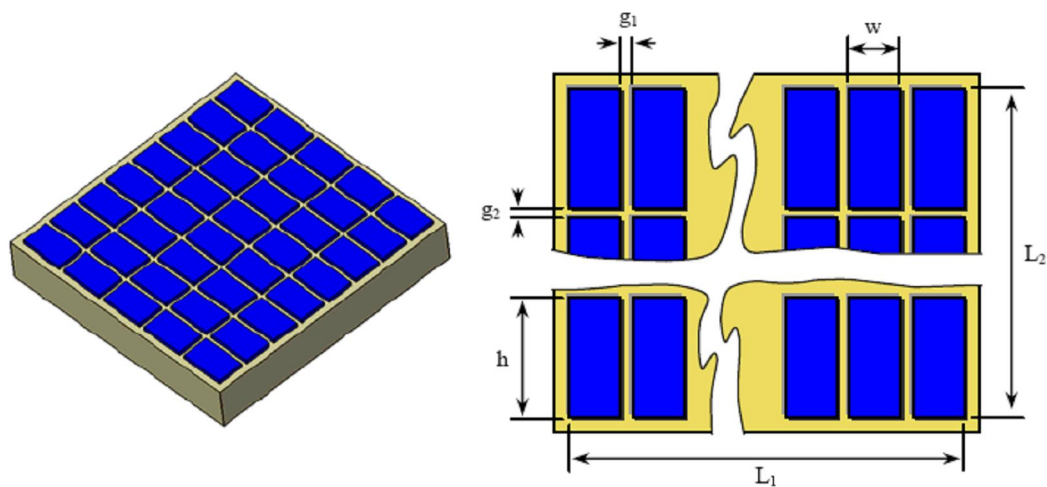
#### ➤ **Matriciales (2-D)**

Los palpadores lineales presentan la desventaja de no poder inspeccionar volúmenes sin desplazamiento físico del palpador. En los casos en que esto sea necesario, puede recurrirse a palpadores de configuración matricial (figura 5.2).



**Figura 5.2:** *Palpadores Phased Array lineal y matricial.* [4]

Éstos están formados por un conjunto de elementos rectangulares, distribuidos en forma de matriz. Ver figura 5.3 a continuación.



**Figura 5.3:** *Esquema de un palpador Phased Array matricial.* [7].



Estos palpadores permiten el control tridimensional del haz ultrasónico, pero presentan grandes problemas de implementación debido al elevado número de elementos necesarios. Por ejemplo, para un Array de 16 x 16 elementos se necesitarían 256 elementos con toda la electrónica involucrada. Otro problema es el procesado de la señal 3-D. Si, además, se desearan realizar barridos electrónicos para cubrir mayores volúmenes, el número de elementos en una de las dimensiones debería ser elevado para abarcar una longitud aceptable. Tanto la fabricación como la operación de estos palpadores son actualmente muy complicadas.

Por otro lado, hay que destacar que la complejidad de los palpadores 2-D aumenta con el factor  $N^2$ . Para reducir este inconveniente, los únicos sistemas prácticos factibles empleados hasta el momento se basan en movimientos mecánicos para generar una imagen volumétrica o usar “1.25-D ó 1.5-D” arrays. Estos palpadores matriciales sub-2-D reducen la complejidad mediante la restricción del direccionamiento del haz únicamente al plano lateral. Otro problema importante de este tipo de palpadores Phased Array 2-D es la necesidad de cables mucho más largos para acceder a los elementos adicionales. El cable es una de las partes de mayor coste del sistema de ultrasonidos completo, además de la dificultad de manejo que entraña el llegar a emplear 256 o más microcables coaxiales. Debido a esto, se hace imprescindible el uso de multiplexores de alto voltaje en el manejo de un palpador para conseguir la reducción del número de cables a emplear.

Mediante la definición de las adecuadas leyes de retardo pueden conseguirse:

- *Focalización*: no limitándose ahora únicamente a un plano, sino que es posible enfocar puntos dentro de un determinado volumen.
- *Direccionamiento del haz*: de la misma manera, ahora el direccionamiento puede llevarse a cabo fuera de un plano.

#### ➤ **Anulares**

Cuando las actuaciones requeridas al palpador se limitan a la focalización a distintas profundidades según un eje, la mejor opción son los palpadores anulares, cuyo esquema se muestra en la figura 5.4. Con este tipo de palpadores ya no es posible realizar barridos

electrónicos ni inspecciones en planos o volúmenes sin desplazamiento mecánico. Presentan la ventaja de eliminar la necesidad de disponer de palpadores convencionales focalizados a distintas profundidades debido a que ya, con un único palpador de este tipo, se puede enfocar a la profundidad deseada.

Con una geometría anular también es posible realizar inspecciones volumétricas mediante palpadores anulares segmentados (figura 5.4).



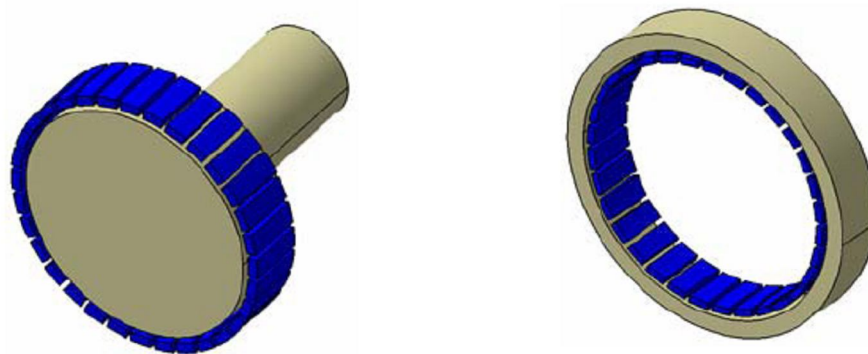
**Figura 5.4:** Esquema de un palpador Phased Array anular (izq.) y anular segmentado (dcha.). [4]

Con esta configuración puede controlarse el haz ultrasónico con un número menos de elementos que en el caso de palpadores matriciales. Sus capacidades son las que se enumeran a continuación:

- *Focalización:* limitada al eje en los palpadores anulares y tridimensional en los palpadores segmentados.
- *Direccionamiento del haz:* Únicamente en el caso de palpadores anulares segmentados.

#### ➤ Circulares

En este tipo de palpadores, los elementos piezoeléctricos se distribuyen por el perímetro interior o exterior de un soporte cilíndrico, como se aprecia en la figura 5.5.



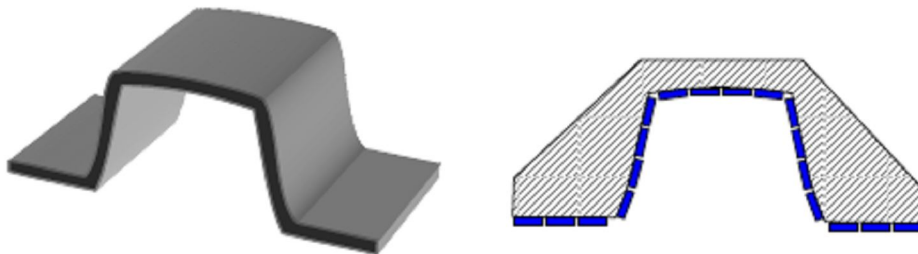
**Figura 5.5:** Esquema de palpadores Phased Array circulares para inspección interior (izda.) y exterior (dcha.). [7].

Al igual que en el caso de palpadores lineales, éstos permiten realizar barridos electrónicos, reduciendo drásticamente los tiempos de inspección.

Su aplicación principal consiste en la inspección de barras y conductos, requiriendo realizar el barrido mecánico según la generatriz de éstos.

#### ➤ De geometría especial

Los palpadores Phased Array, al estar compuestos de elementos individuales, pueden distribuirse a la hora de su fabricación según los requerimientos de una inspección de una determinada pieza con geometría específica, como se muestra en la figura 5.6.

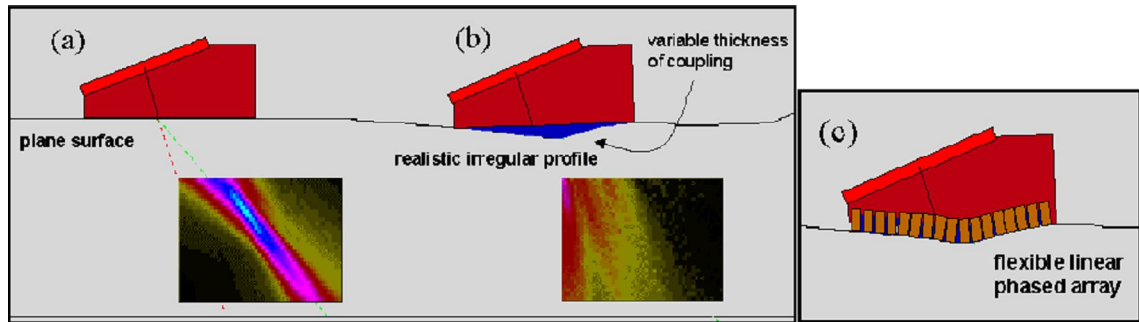


**Figura 5.6:** Sección de un larguero en omega junto a un posible diseño de palpador Phased Array para su inspección. [7]



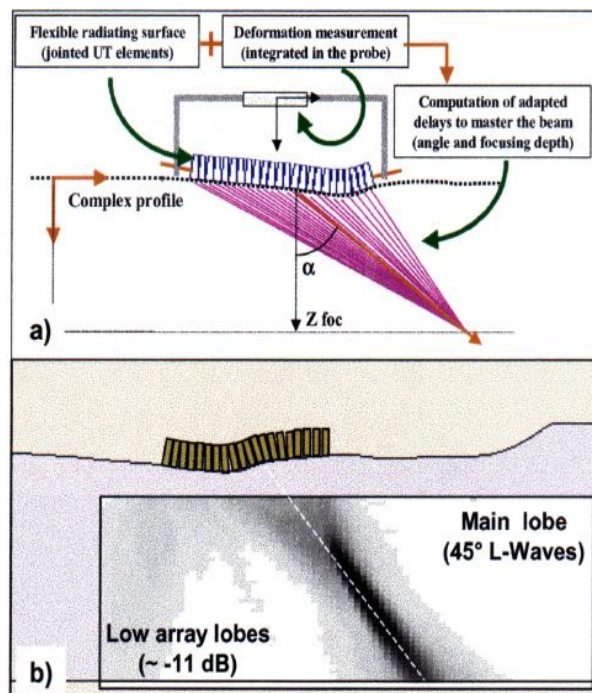
### ➤ De geometría adaptable

En la actualidad existen proyectos de desarrollo de palpadores deformables [9], de modo que los elementos piezoeléctricos se adaptan a la geometría del espécimen a inspeccionar, proporcionando un acoplamiento óptimo, según se muestra en la figura 5.7.



**Figura 5.7:** Simulación de un haz focalizado transmitido a través de una superficie plana (a), una superficie irregular real (b) y un palpador flexible que se adapta a la superficie (c). [10]

La principal dificultad con la que se encuentran estos sistemas es que, para el cálculo de las leyes de retardo, se requiere conocer la posición exacta de cada elemento, por lo que es necesario incorporar sistemas de posicionamiento, aumentando considerablemente la complejidad del sistema (figura 5.8).



**Figura 5.8:** Palpador de geometría adaptable. [10]

## 5.2 DEFECTOLOGÍA TÍPICA DE PALPADORES

### 5.2.1 Convencionales

Con el uso que se les da a los palpadores de ultrasonidos, es común que se vayan degradando con el paso del tiempo, y que aparezcan defectos del tipo de los enumerados a continuación:

- Rotura del piezoeléctrico
- Daño del material amortiguador
- Degradación de las conexiones
- Ralladura de la superficie, como se aprecia en la figura 5.9, suponiendo el fallo de la capa de adaptación de impedancias entre el material y el propio palpador.
- Inclinación del cristal
- Otros



**Figura 5.9:** *Palpador convencional de inmersión con la superficie degradada.*

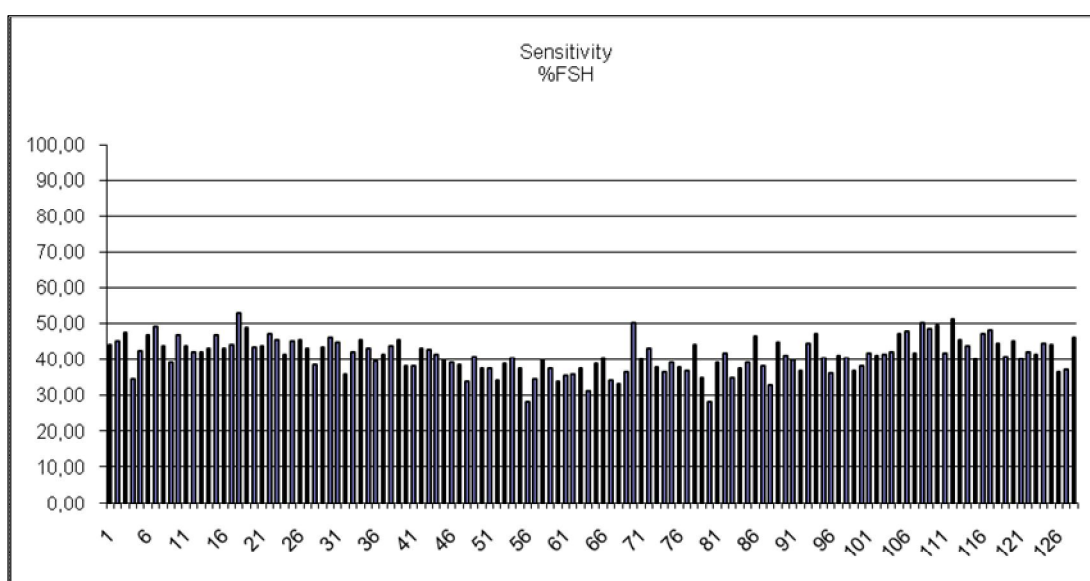
### 5.2.2 Phased Array

En este tipo de palpadores, con la gran vida en servicio a la que están sometidos, también son susceptibles a la aparición de daños en los mismos. Además de los defectos típicos que aparecían en los palpadores convencionales, para Phased Array también cabe destacar:

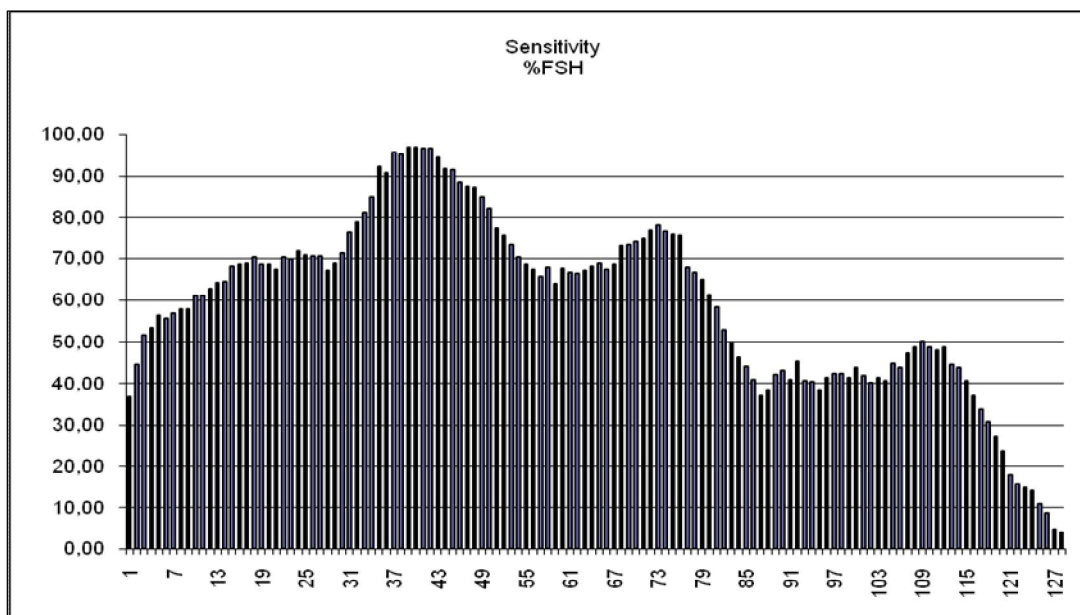
- Acoplamiento entre cristales
- Deterioro o rotura de cristales individuales
- Conexión interna de conectores multipin
- Otros

Esta degradación sufrida por el palpador provoca la aparición de señales que pueden indicar a un inspector la necesidad de realizar una evaluación no programada del mismo, como se verá en el capítulo 7 del presente proyecto.

Como ejemplo ilustrativo de este hecho se presentan los resultados obtenidos de un ensayo para un palpador de 128 elementos que actúa en un sistema de inspección automática de un Centro de Composites de Airbus. Este palpador presentaba un comportamiento extraño al realizar las inspecciones, por lo que se pensó en la posibilidad de que pudiera estar dañado: a igual ganancia que al inicio de las inspecciones, la señal sufría una enorme atenuación. Este hecho no es permisible en los ensayos, dado que el palpador en este estado no detectará correctamente la existencia de defectos, por lo que las inspecciones no serán válidas. Debido a esta razón, se procedió a realizar una evaluación no programada con el fin de analizar las causas de este fallo, comprobándose que la sensibilidad de los elementos, homogénea en la primera evaluación (figura 5.10), se volvía completamente heterogénea tras cinco meses de vida en servicio (figura 5.11).



**Figura 5.10:** Sensibilidad (%) de cada uno de los elementos, inicialmente.



**Figura 5.11:** Sensibilidad (%) de cada uno de los elementos, cinco meses después.

### 5.3 LEYES DE EXCITACIÓN

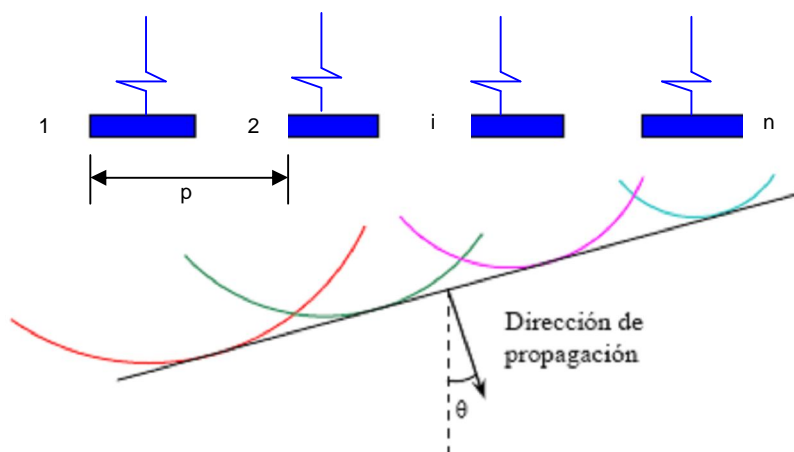
Mediante leyes de excitación se hace referencia a todas las maneras que hay de excitar los piezoeléctricos de un transductor, ya sea por el orden de activación de las distintas secuencias, como por los desfases que se aplican a los impulsos de cada elemento dentro de cada grupo. Esta última manera de variar el modo de excitación es lo que se llama “*leyes de retardo*” que, aunque han sido nombradas anteriormente, no se ha llegado a exponer claramente en qué radican. Las leyes de retardo consisten en no excitar todos los elementos de la apertura activa a la vez, sino que los impulsos lleguen con un cierto desfase los unos respecto a los otros. De esta manera, haciendo uso del principio de Huygens, ya mencionado en el capítulo 4, la interferencia de las distintas ondas generan un haz distinto al que se obtendría con retardos nulos; o lo que es lo mismo, un haz distinto al que se obtendría con un palpador convencional (monocristal).

Principalmente se actúa de tres maneras diferentes para proporcionar el haz deseado: *deflexión del haz, focalización y barrido electrónico*. Este último no tiene por qué implicar

ningún retardo entre los distintos cristales de una misma secuencia: las diferencias de tiempos se dan entre los distintos grupos y no dentro de ellos; pero se ha incluido en este apartado por ser una de las maneras más básicas de alterar la forma de excitación ‘normal’.

### ▪ Deflexión

La deflexión del haz consiste en desviarlo de la vertical (figura 5.12). Esta desviación está comprendida dentro de un cierto ángulo, limitado por la aparición de haces secundarios. Esta cualidad de los palpadores Phased Array los hace muy interesantes para inspeccionar esquinas o zonas de difícil accesibilidad.



**Figura 5.12:** Esquema ilustrativo del proceso de interferencia que da lugar a un haz focalizado. [4]

Para conseguirlo hay que obtener un frente de ondas lo más liso posible pero inclinado respecto de la horizontal el mismo ángulo que se quiere deflectar el haz. Para ello, el primer elemento en ser excitado debe ser el más alejado de la dirección hacia la que se desea dirigir la inspección. Posteriormente se irán excitando el resto de elementos en orden, dejando en todos los casos el mismo desfase entre un piezoeléctrico y el siguiente. La relación entre el ángulo deflectado y el desfase necesario es fácil de deducir mediante trigonometría básica:

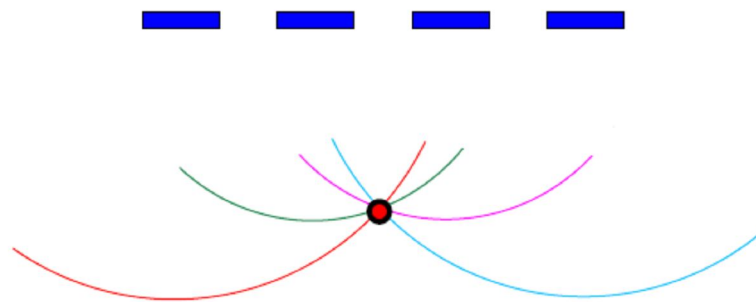
$$r_i = (N - i) \frac{p}{C} \cdot \sin \theta \quad (5.1)$$

siendo  $p$  la separación entre elementos,  $C$  la velocidad del sonido del medio en que se transmite y  $\theta$  el ángulo en que se deflecta el haz. Se observa que las leyes de retardo que

producen este tipo de haz son lineales, presentando el máximo en el elemento extremo hacia donde se defleca el haz. Esta capacidad otorga la posibilidad de realizar barridos sectoriales (S-Scan). Estos barridos son análogos a los electrónicos vistos hasta ahora, sólo que en lugar de barrer a lo largo del transductor, se barre a distintos ángulos, consiguiendo una especie de ‘inspección polar’.

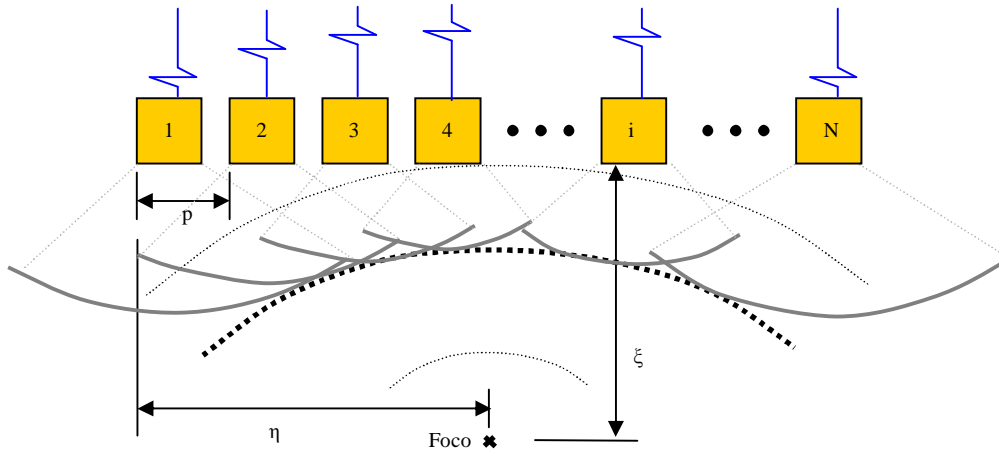
### ▪ Focalización

Como se ha explicado en el capítulo 3, los palpadores convencionales tienen una distancia focal definida por la zona de transición entre el campo próximo y el lejano. En este foco las ondas no interfieren entre sí y la presión acústica y la resolución lateral son máximas, por lo que siempre se intentará que coincida con la zona a examinar. Pero su profundidad viene prefijada por el tamaño del cristal y su frecuencia característica, siendo sólo función de la velocidad acústica del material estudiado. Así pues, para poder ajustarse a las exigencias de cada exploración, se tendrá que disponer de varios palpadores con diferentes distancias focales. Sin embargo, los transductores Phased Array presentan la capacidad de enfocar a cualquier profundidad dentro de un rango. Para definir el foco bastará con utilizar una ley de retardos que provoque que el frente de ondas colapse en ese punto (figura 5.13).



**Figura 5.13:** Esquema ilustrativo de la generación del frente de ondas por cada elemento. Focalización en un punto. [7]

Aunque resulta un poco más difícil de deducir que la ley de retardos lineal, tras unas sencillas operaciones se obtiene la siguiente ley de retardos parabólica (figura 5.14):



$$r_i = \frac{\sqrt{\eta^2 + \xi^2}}{C} - \frac{\sqrt{\eta^2 + [\xi - (i-1)p]^2}}{C} \quad (5.2)$$

**Figura 5.14:** Ley de retardos parabólica. [7]

Cuanto más lejos se quiera focalizar se tendrán que utilizar retardos menores. En el límite, aplicando una ley de retardos nula, se alcanzará la máxima distancia focal, que coincide con la longitud del campo próximo de un piezoeléctrico tan grande como la apertura activa que se esté usando.

Se pueden combinar la ley parabólica para focalizar y la lineal para dirigir, consiguiendo un haz que apunta exactamente al punto que se desea estudiar aunque éste no esté debajo del transductor.

#### ▪ Barrido electrónico

Como se ha mencionado anteriormente, realmente puede no ser considerado como una ley de excitación en sí, ya que sólo determina el orden en que se activarán las distintas secuencias. No obstante, se incluye en este apartado por ser otra de las útiles herramientas que nos ofrecen los palpadores Phased Array.



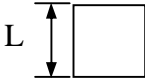
Gracias al barrido electrónico se puede inspeccionar en toda la longitud del palpador sin la necesidad de desplazarlo. Si se representa este barrido en un B-Scan que sea actualizado con la suficiente frecuencia, se obtendrá una imagen en tiempo real del estado del componente en la sección que está debajo del palpador. En el fondo sería la generalización a dos dimensiones de la representación A-Scan que ofrecen los palpadores convencionales, pero se obtiene una imagen mucho más fácil de interpretar.

## 5.4 INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN

En capítulos anteriores ya se han destacado algunas de las ventajas inmediatas de la utilización de la tecnología Phased Array en ensayos de ultrasonidos, tanto desde el punto de vista productivo como de la flexibilidad del método (posibilidad de enfoque, deflexión, etc.). En contrapartida, se encuentran ciertos parámetros de configuración, derivados de dicha flexibilidad del sistema, cuya influencia en los resultados ha de ser al menos mencionada. Durante la realización de los ensayos para la evaluación de los palpadores, fundamento del presente proyecto, se pudo comprobar el efecto de la separación del palpador respecto a los reflectores empleados en la evaluación del mismo, así como de la apertura utilizada, explicado en detalle en el capítulo 8 de este proyecto. A continuación se mencionan los efectos que estos parámetros pueden tener en la generación del haz ultrasónico:

- **Apertura**

A la hora de realizar una inspección se debe seleccionar con qué apertura generar el haz ultrasónico, considerando el espécimen, geometría y configuración. Este haz no puede focalizarse en puntos más allá del campo cercano [2]. Como se vio en el capítulo 3, para elementos osciladores rectangulares la longitud del campo cercano viene dada por la siguiente expresión:



$$N = \frac{kL^2}{4\lambda} \quad (5.3)$$





donde  $k$  toma valores entre 0.95 y 1.3, como se muestra en la tabla 5.1:

Ratio ancho/largo	$k$
1.0	1.37 (elemento circular)
0.9	1.25
0.8	1.15
0.7	1.09
0.6	1.04
0.5	1.01
0.4	1.00
0.3 e inferiores	0.99

**Tabla 5.1** Valores del coeficiente  $k$  en función de la relación entre el ancho y el largo de cada elemento [2].

A partir de esto puede observarse que, a mayor apertura, mayor longitud del campo cercano y por tanto mayor capacidad de enfoque.

Otro factor que depende de la apertura utilizada es la anchura total del barrido electrónico. Si se considera que el eje del haz parte del punto medio de la apertura activa, la anchura del barrido ( $A$ ) vendrá dada por la siguiente expresión:

$$A = (N - n) \cdot p \quad (5.4)$$

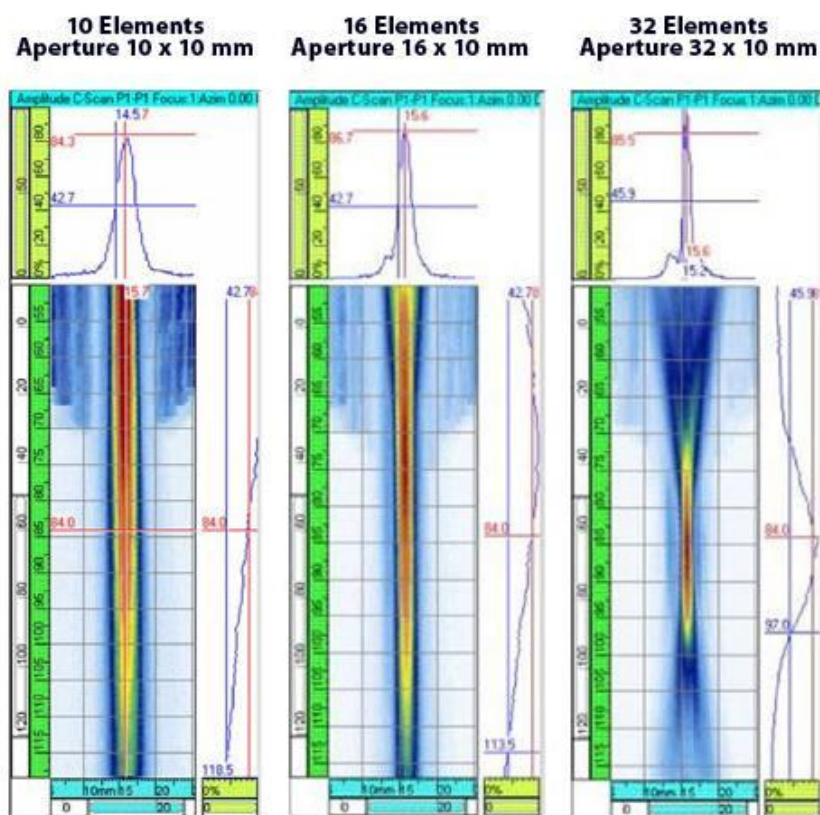
siendo  $N$  el número total de elementos que componen el palpador,  $n$  el número de elementos que conforman cada grupo y  $p$  el paso entre elementos, como se ha especificado anteriormente.

De esta manera se observa que, a mayor apertura (dada por  $n$ ), menor anchura de barrido, por lo que se deberán realizar un mayor número de pasadas para cubrir un área determinada.

Por otro lado, a mayor apertura utilizada, un mayor número de elementos contribuyen a la generación del haz ultrasónico. Es por esto que, a mayor apertura, mayor energía, lo que

lleva a la necesidad de utilizar aperturas grandes para contrarrestar la atenuación que se produce en ciertos materiales. Si, en este caso, en lugar de la emisión se considera el proceso de recepción, ocurre que a mayor número de señales coherentes sumadas se obtiene una mejor relación señal/ruido, por lo que parece que son beneficiosas las aperturas grandes. Sin embargo, aperturas excesivamente grandes pueden empeorar esta relación por la pérdida de coherencia al estar más separados los elementos.

Sin embargo, existe un problema al utilizar aperturas grandes. Como ya se ha mencionado, el proceso de configuración con palpadores Phased Array se basa en la interferencia constructiva de las ondas, resultado de la emisión controlada en el tiempo. Cuando la apertura es grande, esta interferencia no se produce únicamente en la zona deseada, sino que existe la posibilidad de que aparezca un haz secundario que puede dar lugar a indicaciones que no se corresponden con el haz principal, que son las que se desean evaluar (figura 5.15).



**Figura 5.15:** Comparación de las formas del haz empleando diferentes aperturas. [2]



- **Distancia palpador-pieza**

La distancia a la que se puede colocar un palpador focalizado convencional está dentro de un rango muy definido en sus especificaciones. El inspector, a la hora de realizar una inspección no tendrá más que respetar la distancia focal indicada en la documentación del palpador. Esto mismo ocurre cuando los palpadores son no focalizados, para los que se define una distancia  $Y_{0+}$ , o punto de máxima presión acústica.

Por el contrario, con la tecnología Phased Array, para un mismo palpador se pueden definir distintas profundidades de enfoque sin más que modificar la configuración de retardos. Esto hace que no se tenga una distancia focal definida, por lo que a la hora de realizar un ensayo se tiene un nuevo grado de libertad; sin embargo, esta separación entre el palpador y la pieza está limitada superior e inferiormente por parámetros fácilmente identificables, como son:

- *Limitaciones físicas:* ya sea por el automatismo utilizado, por la profundidad de la cuba en la que se realiza el ensayo o por las zapatas disponibles en ensayos por contacto.
- *Potencia máxima de generación de señal del equipo:* Podría darse el caso de que la señal se atenuase demasiado en el viaje hacia la pieza, retornando una señal no evaluable.
- *Zona muerta del palpador:* Si se coloca el palpador muy próximo a la pieza, puede ocurrir que los ecos de interés queden dentro de esta zona, resultando imposible la evaluación.
- *Ecos fantasmas:* A medida que se acerca el palpador a la pieza es más probable que aparezcan estos ecos fantasmas en la zona de evaluación, dificultando la realización del ensayo.
- *Máxima distancia focal:* Mediante métodos de focalización geométricos no es posible conseguir distancias focales mayores que la longitud del campo cercano,



por lo que, dada una apertura, la separación estará limitada a la longitud del campo cercano.

Conociendo estas limitaciones, se podrá escoger en este rango la distancia focal deseada y colocar el palpador alejado de la pieza consecuentemente. A la hora de determinar este distanciamiento es importante recordar que la onda viajará a través de dos materiales distintos, con distintas velocidades acústicas: el fluido acoplante y el material de la propia pieza.

- **Profundidad de campo**

Al escoger la distancia palpador-pieza también debe tenerse en cuenta la profundidad de campo. Ésta se define como la zona que existe entre el foco y la zona con  $-6\text{dB}$  de atenuación respecto a ésta (ver figura 3.12, en el capítulo 3). Aunque es cierto que se puede focalizar en todo el rango que se acaba de definir, no es lo mismo focalizar cerca del mínimo que cerca del máximo. Básicamente, esto es debido a que las diferencias de fase en el entorno del foco varían de distinta manera. Si el foco está situado cerca del transductor las diferencias de fase fuera de él serán grandes, obteniéndose un foco muy localizado. Sin embargo, al aumentar la distancia, las ondas elementales serán más similares entre ellas, provocando que las diferencias de fase alrededor del foco sean menores. Por tanto, el foco se dispersará y suavizará, quedando menos definido. A menor separación del palpador se tendrá una mayor divergencia del haz ultrasónico y un foco más definido.

Además, también variará la divergencia del haz ultrasónico. Para visualizarlo, como primera aproximación se puede imaginar que el haz ocupa la zona delimitada por las dos rectas que, partiendo de los extremos de la apertura, se cruzan en el foco. En ese caso, cuanto más alejado esté el foco, menor será la divergencia del haz.

- **Mínimo retardo de tiempo**

Las capacidades de la tecnología Phased Array tienen un límite en el mínimo retardo de tiempo que la tecnología actual es capaz de manejar (en torno a  $5\text{ns}$ ). Es decir, el desfase entre



los impulsos que llegan a dos elementos está limitado por el hecho de que la electrónica actual no es capaz de discriminar y generar desfases menores.

Sería interesante conseguirlo, ya que así se obtendría un control más fino de la deflexión de haz y de la focalización a grandes profundidades, ya que cuando la distancia focal tiende a la longitud del campo cercano los desfases tienden a cero.





## CAPÍTULO 6

# POSIBILIDAD DE LA TECNOLOGÍA PHASED ARRAY EN LOS ACTUALES DISEÑOS EN MATERIALES COMPUESTOS

### 6.1 DEFECTOLOGÍA TÍPICA

---

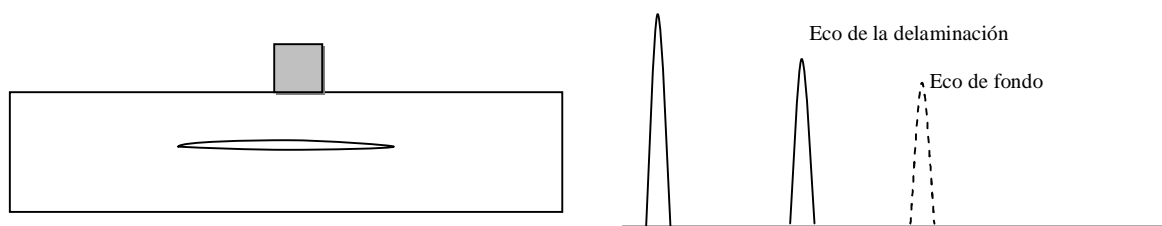
La producción de componentes de material compuesto involucra una serie de métodos de fabricación muy característicos y distintos a los tradicionalmente empleados en materiales metálicos. Dichos métodos de fabricación pueden generar una defectología igualmente particular.

Por otro lado, el comportamiento de estos materiales difiere considerablemente del de los materiales metálicos, por lo que durante su vida en servicio pueden sufrir daños que se manifestarán de forma también diferente. Debido ello, se dedican los siguientes párrafos a la descripción de los diversos tipos de defectos (ya sean producidos en fabricación o en servicio) que pueden poner en peligro la actuación de los componentes y que, por tanto, deben poder ser detectados.

- **Delaminación:**

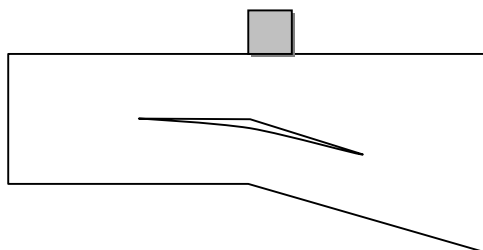
Se define como la separación entre dos telas contiguas en una estructura multicapa.

Una delaminación se detecta ultrasónicamente por la aparición de una indicación intermedia, desapareciendo la indicación del eco de fondo. La amplitud de la delaminación no será inferior a la de este eco de fondo (figura 6.1).



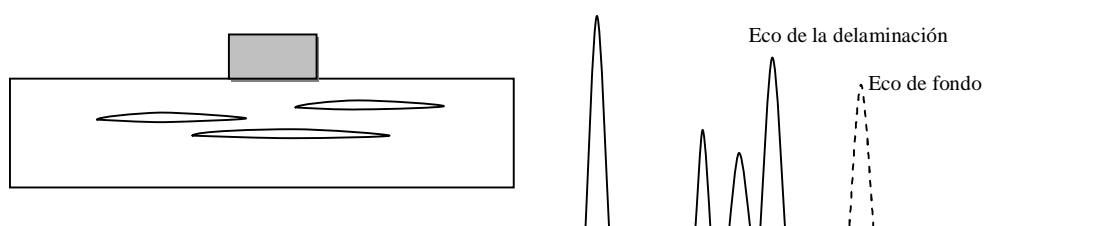
**Figura 6.1:** Representación de la señal producida por una delaminación. [6]

La delaminación puede producirse a distintas profundidades, dando lugar a indicaciones de amplitud dependiente de la orientación de la delaminación (figura 6.2).



**Figura 6.2:** Delaminación a distintas profundidades. [6]

Cuando se producen delaminaciones múltiples (figura 6.3), aparecerán indicaciones intermedias a distintas profundidades. La altura de los ecos dependerá de la superficie de las delaminaciones, pero suele ser similar a la del eco de fondo.



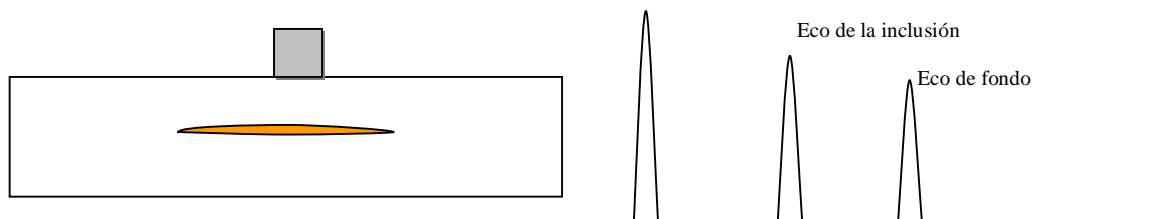
**Figura 6.3:** Representación de la señal ultrasónica generada por delaminaciones múltiples. [6]

#### ▪ **Inclusión u objeto extraño**

Consiste en la presencia de cualquier material no específicamente indicado en la lista de componentes del elemento.



La señal recibida en la inspección se caracteriza por la aparición de una indicación intermedia pero sin la desaparición del eco de fondo. La amplitud de la indicación dependerá tanto de la geometría como del material de la inclusión. Podría desaparecer incluso el eco de fondo comportándose como una delaminación (figura 6.4).

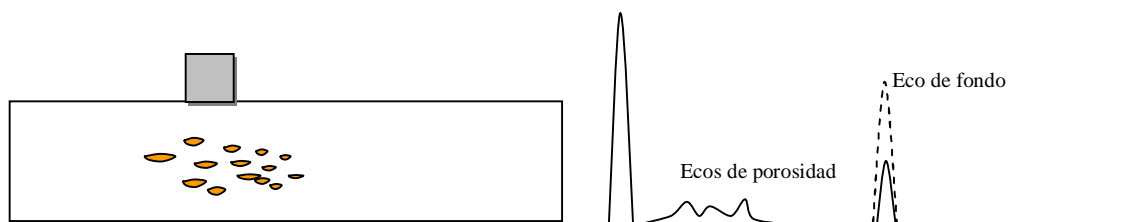


**Figura 6.4:** Representación de la señal generada por una inclusión en el material. [6]

#### ▪ **Porosidad**

- *Uniformemente distribuida (porosidad volumétrica):*

Se define como la acumulación de huecos distribuidos aleatoriamente. La señal se caracteriza por una disminución de amplitud del eco de fondo y puede venir a veces acompañada de pequeños ecos con amplitudes por debajo del 30% (figura 6.5).

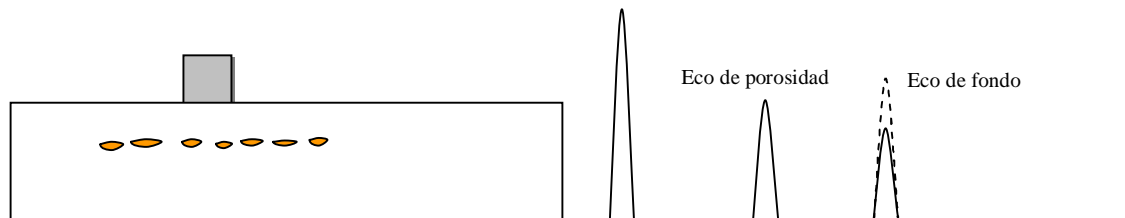


**Figura 6.5:** Representación de la señal generada por porosidad uniformemente distribuida en el material. [6]

- *En capa:*

Consiste en una acumulación de huecos que se localizan entre telas contiguas. Este tipo de porosidad se caracteriza por la aparición de una indicación intermedia, a una profundidad constante, manteniéndose ésta mientras se produce el desplazamiento del palpador sobre la

pieza. La amplitud es variable y viene acompañada de la disminución del eco de fondo (figura 6.6).

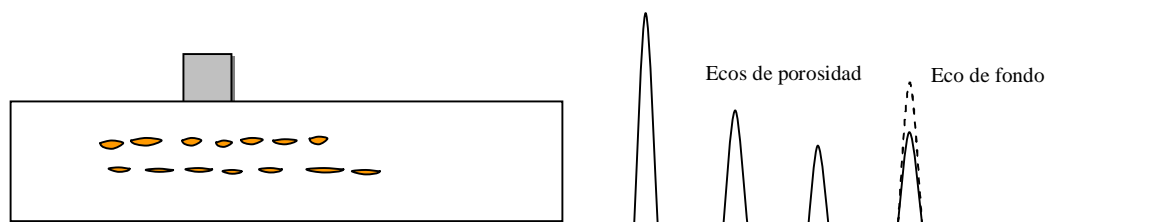


**Figura 6.6:** Representación de la señal generada por porosidad en capa. [6]

- *En varias capas*

La porosidad en varias capas viene dada por la acumulación de pequeños huecos entre telas contiguas a distintas profundidades.

Aparecen ultrasónicamente, en este caso, varias indicaciones intermedias a profundidades constantes y de amplitud variable, manteniéndose mientras se desplaza el palpador. Vienen acompañadas por la disminución del eco de fondo. Ver figura 6.7.



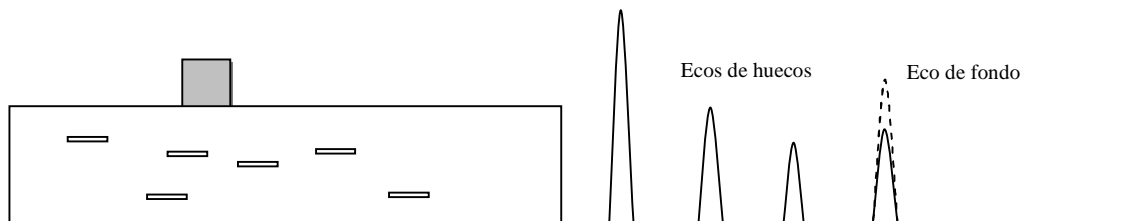
**Figura 6.7:** Representación de la señal generada por porosidad en varias capas. [6]

▪ **Huecos planos:**

Consisten en pequeñas discontinuidades aisladas, con una geometría de caras planas que provocan reflexiones del haz. Son ligeramente más grandes que los poros, pero sin llegar a considerarse una delaminación.

La señal ultrasónica se caracteriza por la aparición de indicaciones intermedias, que desaparecen al realizar pequeños movimientos del palpador. Aparecen a varias profundidades

presentando amplitud variable. El eco de fondo disminuye en amplitud pudiendo incluso llegar a desaparecer (figura 6.8).

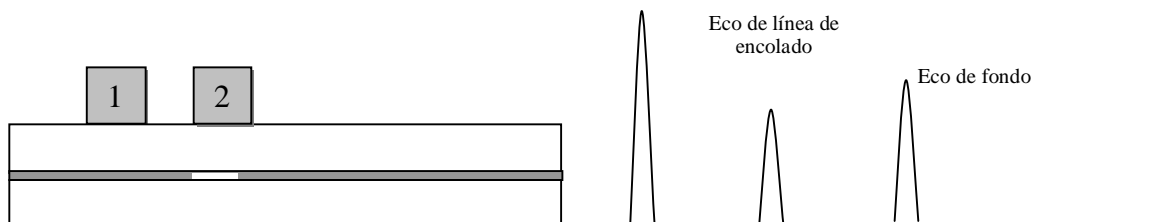


**Figura 6.8:** Representación de huecos planos en el material. [6]

#### ▪ **Desencolado**

Este tipo de defecto se define como la falta de continuidad en uniones con adhesivo.

La señal ultrasónica se caracteriza por la aparición de una única indicación intermedia coincidente con el eco de encolado y amplitud superior, desapareciendo totalmente el eco de fondo (figura 6.9).

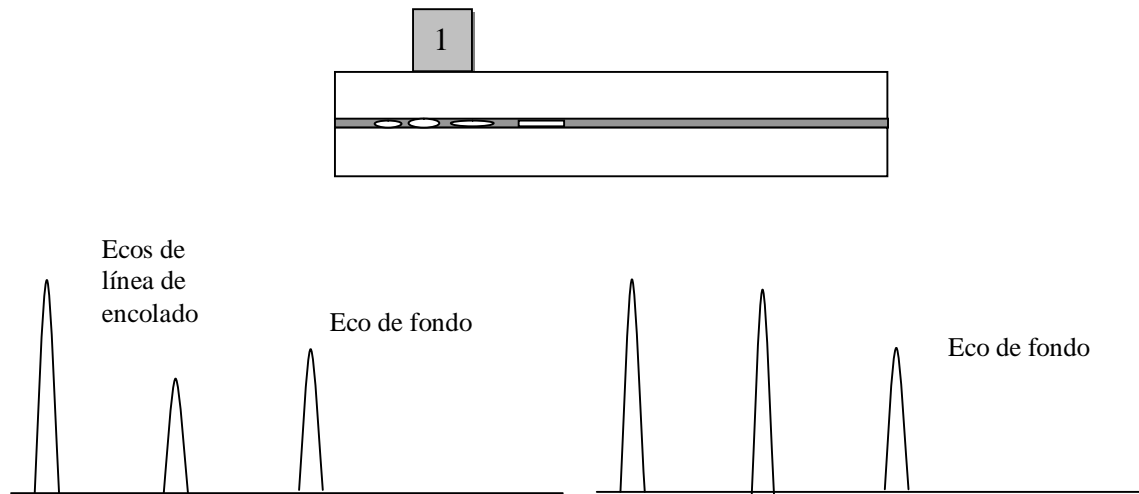


**Figura 6.9:** Representación de la señal producida por desencolado en el material. [6]

#### ▪ **Porosidad en la línea de adhesivo**

Consiste en la aparición de huecos en uniones realizadas con adhesivo.

Se caracteriza por la aparición de una indicación intermedia única, coincidente en espesor con el eco de la línea de encolado de amplitud mayor que en el caso la zona sana, disminuyendo la amplitud del eco de fondo (figura 6.10).



**Figura 6.10:** Representación de la señal generada por porosidad en la línea de adhesivo. [6]

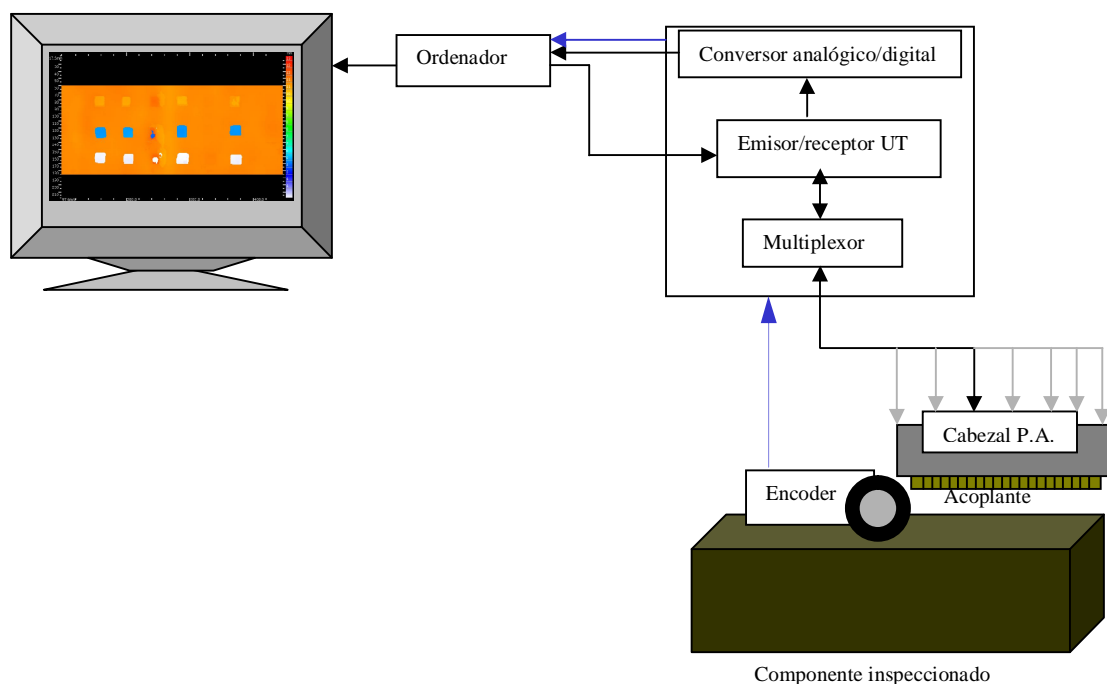
## 6.2 SISTEMAS SEMIAUTOMÁTICOS

Los sistemas semiautomáticos son aquéllos que se caracterizan porque, a pesar de que el desplazamiento del palpador se realice de forma manual, ligan la información ultrasónica con la información espacial. La medida de la posición del palpador puede efectuarse a través de encoders mecánicos, receptores acústicos, etc.

Estos sistemas son adecuados para analizar piezas pequeñas o zonas concretas de piezas grandes. Resultan muy útiles a la hora de obtener pequeños registros tipo C-Scan, donde el desplazamiento del palpador se realiza en una sola dirección. Si las coordenadas del palpador deben variar en dos dimensiones, la situación se complica y resulta más adecuado recurrir a barridos automáticos. Se emplean normalmente palpadores lineales, debido a que el barrido unidimensional obliga a adoptar esta configuración; el desplazamiento del transductor hace innecesaria la deflexión del haz en esa dirección, no necesitando recurrir a una distribución matricial. En cuanto a los palpadores anulares, éstos presentan su mayor ventaja a la hora de enfocar a cierta profundidad, pero en cuestión de barridos no se diferencian excesivamente de un palpador convencional.

Un sistema semiautomático Phased Array debe contar al menos con los siguientes componentes, mostrados en la figura 6.11:

- Conjunto de piezoeléctricos Phased Array (palpador)
- Encoder
- Sistema de acoplamiento
- Electrónica asociada al tratamiento de datos: multiplexor, emisor/receptor de ultrasonidos, conversor analógico/digital y ordenador



**Figura 6.11:** Esquema de una instalación semiautomática Phased Array. [4]

### 6.3 SISTEMAS AUTOMÁTICOS

En la actualidad, el control de calidad de los componentes fabricados en material compuesto puede llegar a suponer un tercio de su coste total. Esto es así debido a que se debe inspeccionar el cien por cien de la producción, no pudiéndose realizar normalmente controles estadísticos del proceso, como se ha explicado anteriormente. Por ello, es de enorme importancia la reducción de costes asociados a los ensayos no destructivos, siendo la



disminución del tiempo de barrido por pieza en cada inspección un método de gran efectividad para conseguirlo. (Hay que destacar que las operaciones de inspección consisten en: preparación de la pieza, barrido de la misma, evaluación y procesos finales).

Es en este punto donde entran en juego las instalaciones de inspección automáticas que, sustituyendo el movimiento manual del palpador por movimientos programados, permiten aumentar considerablemente la velocidad de inspección.

La reducción de tiempos no es el único factor que hace de estas instalaciones un recurso indispensable sino que, además, presentan ciertas ventajas que las hacen aún más atractivas si cabe:

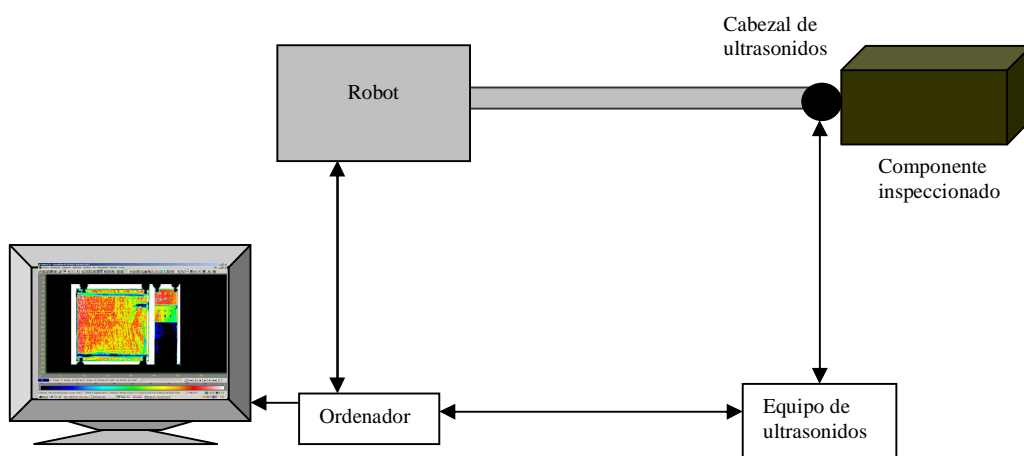
- Registros permanentes
- Disminución de la intervención del inspector
- Evaluación vía software de la inspección de la pieza
- Aseguramiento de que el 100% de la superficie de la pieza ha sido inspeccionada.

Las instalaciones de inspección automáticas pueden definirse como aquellos sistemas que, sin requerir la intervención de un inspector, salvo en la fase de preparación del ensayo, son capaces de obtener información evaluable en tiempo real o a posteriori sobre el estado de un componente. Según esta definición, el factor humano sólo interviene durante la fase de configuración y puesta a punto de la inspección, implicando que el sistema debe ser capaz por sí solo de realizar los movimientos necesarios para posicionar el palpador, adquirir la señal ultrasónica extrayendo de ésta las indicaciones necesarias y representar esta información de forma evaluable (C-Scan, B-Scan, etc.).

No obstante, el llevar a cabo estas operaciones sobre la totalidad de un componente puede resultar inviable en ciertas ocasiones, haciendo necesario complementar estos sistemas automáticos con métodos tradicionales de inspección manual o semiautomática. Un ejemplo de ello sería la inspección de revestimientos con rigidizadores incorporados, inspeccionándose la piel de forma automática pero exigiendo la inspección manual de las almas y alas de los rigidizadores.

Antes de que apareciera la tecnología Phased Array, las inspecciones se hacían en plataformas de pórtico, recurriendo normalmente a inspecciones por transmisión o a multipalpadores por pulso-eco. Pero hoy en día se quiere inspeccionar haciendo uso de la tecnología Phased Array, debido a las ventajas que ofrece y que se han comentado anteriormente. Para ello el equipo mínimo necesario debe estar compuesto por los elementos enumerados a continuación y mostrados en la figura 6.12:

- Cabezal
- Robot
- Equipo de Phased Array
- Ordenador



**Figura 6.12:** Esquema de una instalación automática Phased Array. [4]

Los sistemas automáticos son claramente mejores que los semiautomáticos a la hora de barrer en más de una dimensión. Además, una vez se ha puesto en marcha una inspección, el sistema sólo necesita ser supervisado por si sucede algún incidente, permitiendo al inspector u operario de máquina dedicarse a otras labores.

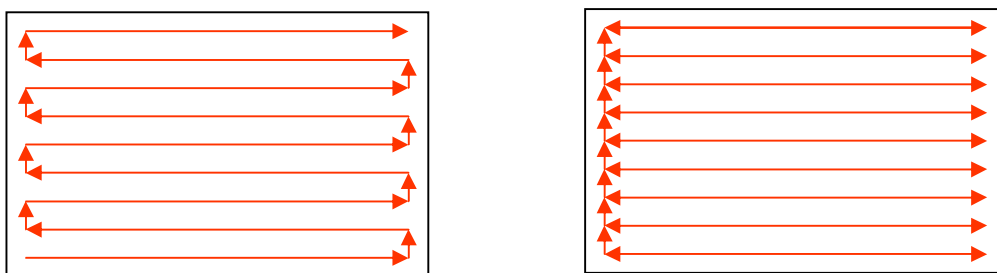
Como inconveniente, se ha de mencionar que la ingente cantidad de información que hay que manejar requiere bastante tiempo y espacio en disco, limitando en parte la mejora en ahorro de tiempo. Es decir, que las evaluaciones (en cuanto a detección, identificación, dimensionado y aplicación de criterios de reporte) no se podrán realizar a la máxima

velocidad que el robot sea capaz de desarrollar, sino que estarán limitadas por el tiempo necesario para el tratamiento de datos.

En lo referente a los palpadores, su desplazamiento en los sistemas automáticos lo realiza la máquina, cuya posición suele estar controlada por retroalimentación. Dicho bucle de control ofrece la posibilidad de obtener la información relativa a la posición del palpador haciendo en muchos casos innecesario añadir encoders para medida en otros lugares. Por otra parte, el hecho de que el desplazamiento no sea manual obliga a definirle a la máquina la trayectoria de inspección que se desea que siga.

Los palpadores deberán diseñarse de acuerdo al tipo de inspecciones que se quieren realizar. Para empezar, y debido a que los palpadores phased array trabajan con pulso-eco, para acoplar el cabezal y la pieza se podrá escoger entre hacerlo por inmersión o por contacto, requiriendo cada modo una determinada combinación de tipos de palpadores y cabezales.

En cuanto a las trayectorias, el sistema Phased Array no introduce nuevos problemas o variantes. La trayectoria más habitual será la rectangular (figura 6.13), siempre y cuando los encoders funcionen igualmente en ambas direcciones. Si tal y como pasaba con los encoders de sistemas semiautomáticos sólo funcionan en una dirección, se tendrá que escoger una trayectoria en peine, o girar el cabezal 180° después de cada uno de los tramos rectos.



**Figura 6.13:** Representación esquemática de las trayectorias más habituales para encoders unidimensionales: rectangular (izda.) y en peine (dcha.). [4]

Otras trayectorias clásicas que podrán ser utilizadas son la espiral (piezas circulares), la helicoidal (tubos y barras), etc. Si la pieza a estudiar es de forma cónica (por ejemplo, la sección del cono de cola de un fuselaje) se deberá barrer en la dirección de las generatrices solapando las distintas pasadas para no dejar ninguna zona sin analizar, ya que si se intentara inspeccionar en una trayectoria espiral, siempre quedarían zonas sin cubrir.





### 6.3.1 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS

El comportamiento de la mayoría de parámetros es el mismo en las inspecciones automáticas que en las semiautomáticas. De los parámetros estudiados en el capítulo 5 el único que puede variar es la distancia palpador-pieza, que en las inspecciones semiautomáticas está determinado por el medio de acoplamiento escogido; esto es, por el tamaño de la zapata, el radio de la rueda, etc. En los sistemas automáticos, al poder optar por el acoplamiento por inmersión, la distancia palpador-pieza podrá ser variable dependiendo de la distancia  $Y_o+$  del palpador, teniendo en cuenta la profundidad de campo (con  $Y_o+$ ) y el espesor de la pieza que se pretende analizar.





## CAPÍTULO 7

# GENERALIDADES EN LA EVALUACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

### 7.1 OBJETIVOS

---

Tanto los palpadores (ya sean convencionales o Phased Array) como equipos e instalaciones utilizados en inspecciones por ultrasonidos deben ser evaluados para:

- a) Asegurar su capacidad para conseguir el funcionamiento requerido bajo condiciones reales de inspección.
- b) Garantizar un nivel de uniformidad suficiente en todas las instalaciones y equipos trabajando con una misma técnica (p.e., transmisión, pulso-eco) con el propósito de conseguir repetitividad y reproducibilidad en los resultados de las inspecciones, de manera análoga con todos los sistemas.
- c) Asegurar, mediante evaluaciones periódicas, que las posibles degradaciones de las características ultrasónicas (golpes, deterioro de componentes, desoldaduras, etc.) de los palpadores, equipos e instalaciones, que puedan afectar a los resultados de las inspecciones, sean detectados y corregidos y, en consecuencia, afirmar que sus características se mantienen dentro de unos niveles aceptables según la norma aplicable a lo largo de toda su vida en servicio.

Restringiéndonos al tema central del proyecto, **el objetivo del Procedimiento realizado es describir los pasos a seguir para llevar a cabo la evaluación de palpadores de ultrasonidos tipo Phased Array de acuerdo a la normativa aplicable interna de Airbus AITM6-0016 [1].** Este Procedimiento es aplicable a todos los palpadores Phased Array que



vayan a ser utilizados tanto en instalaciones automáticas como en equipos semiautomáticos o manuales, y se desarrollará con mayor profundidad en el capítulo siguiente.

Con esta evaluación se estará en disposición determinar la conformidad o no conformidad de los palpadores para ser utilizados en la inspección no destructiva de materiales por ultrasonidos y aportar resultados correctos y fidedignos.

## **7.2 PARÁMETROS A EVALUAR**

---

Durante el proceso de evaluación de palpadores, ya sean convencionales o Phased Array, se han de realizar una serie de ensayos requeridos por las Normas AITM 6-0013 [11] y AITM 6-0016 [1], respectivamente, a partir de cuyos resultados se podrá determinar la conformidad o no conformidad de los palpadores.

Si se sospecha que durante el proceso los materiales, equipos, instalaciones o palpadores no cumplen con los requerimientos de la norma, el proceso de inspección debe pararse hasta conseguir la conformidad con ésta y contar con la aprobación del departamento de calidad.

En cuanto a las características de realización de los ensayos de evaluación de los palpadores se han de distinguir tres tipos diferenciados: los ensayos de recepción, los de evaluación periódica y los no programados. Éstos, con sus correspondientes parámetros a evaluar, se describen a continuación:

### **7.2.1 ENSAYOS DE RECEPCIÓN (o de caracterización)**

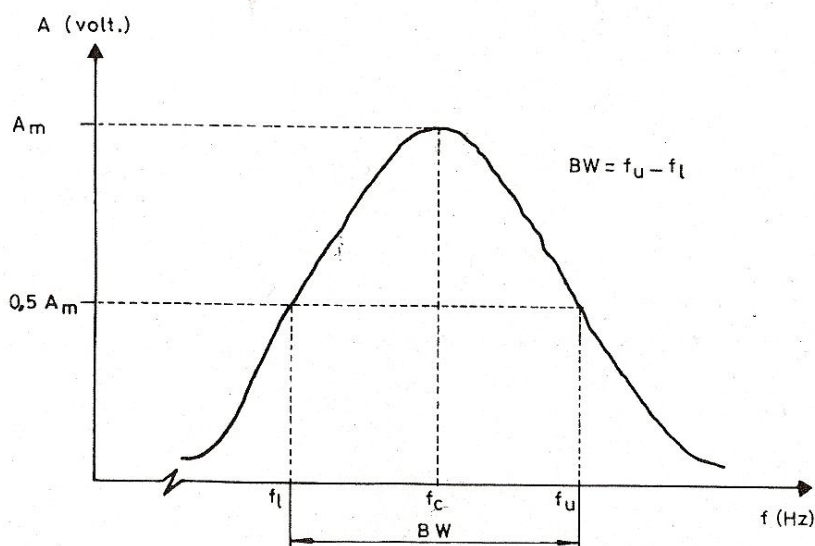
Los palpadores de primera evaluación son los que se reciben por primera vez para realizar su evaluación, independientemente de que sean nuevos o no. Los ensayos que se realizan para su evaluación son los denominados *de recepción*. Los valores obtenidos a partir de estos ensayos de recepción se tomarán como *valores nominales* y serán considerados como referencia para las futuras evaluaciones durante la vida en servicio.

La realización de los ensayos de recepción puede considerarse como válida si se cumplen las siguientes condiciones:

- Se evalúan y reportan al menos las características requeridas por la norma;
- El procedimiento para evaluar las características está de acuerdo con la norma;
- Los resultados de la evaluación cumplen los criterios de aceptación especificados en la norma;
- Los ensayos periódicos serán realizados siguiendo el mismo procedimiento.

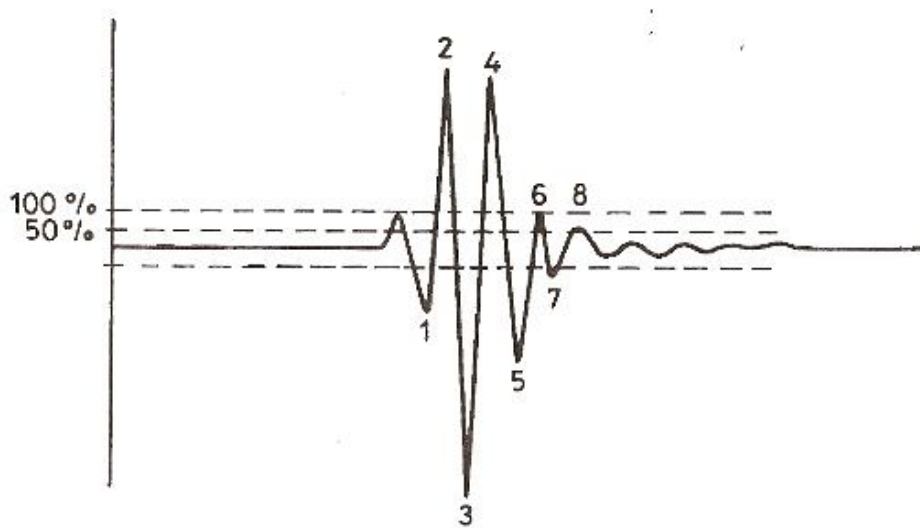
Los parámetros que se han de evaluar mediante los ensayos de recepción realizados son, en este caso:

- **Análisis en frecuencia:** que expresa la amplitud de la respuesta del palpador a una onda de presión en función de la frecuencia. Ver figura 7.1. Se ha de determinar la frecuencia central, la frecuencia pico y el ancho de banda del palpador. Mediante este análisis se comprueba que se ha recibido el palpador con las especificaciones exactas que se solicitaron al suministrador.



**Figura 7.1:** Respuesta típica de un palpador a una onda de presión. [12]

- **Factor de amortiguamiento (Damping):** Una vez obtenida la indicación de radiofrecuencia (R.F.) de un eco ultrasónico, se define como factor de amortiguamiento el número de medios ciclos que superen el 50% del primer medio ciclo exceptuándole a él. Ver figura 7.2. A partir de este análisis también se permite conocer la resolución tanto de elementos individuales, como de haces en palpadores Phased Array.



**Figura 7.2:** Indicación de radiofrecuencia (R.F.) de un eco ultrasónico. [12]

- **Sensibilidad:** Permite comprobar la homogeneidad de los elementos individuales, así como también de haces en palpadores Phased Array. Este parámetro evalúa el palpador como elemento excitable. Si excitamos el palpador con una señal sinusoidal, la sensibilidad se define como la relación, expresada en decibelios, entre los voltajes pico a pico de excitación ( $S_E$ ) y de respuesta ( $S_R$ ).

$$S_r = -20 \log \frac{S_E}{S_R} \quad (7.1)$$

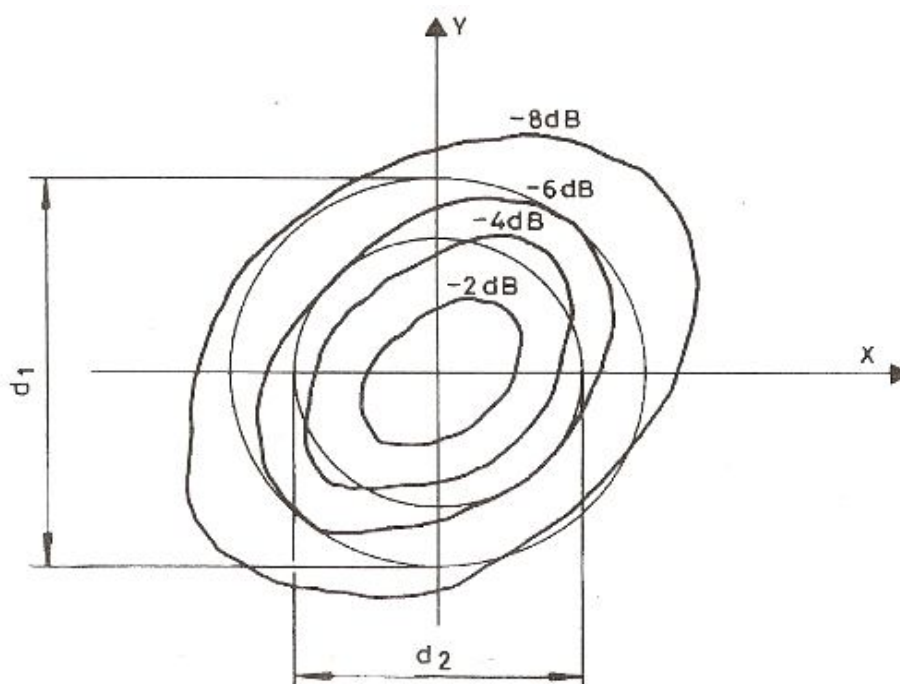


Alternativamente, a efectos prácticos, se puede dar una medida relativa de la sensibilidad obteniendo la amplitud del eco de reflexión en % de pantalla para una determinada ganancia del equipo de ultrasonidos, la cual se elegirá la primera vez que se evalúe el palpador manteniéndose constante en los sucesivos ensayos de evaluación periódicos.

- **Punto  $Y_0$ +** (para palpadores no focalizados): Se define  $Y_0$  como el punto sobre el eje del haz en el cual la presión acústica es máxima.
- **Diámetro y simetría del haz ultrasónico:** La distribución de presión acústica en un plano perpendicular a la dirección de propagación del haz no es uniforme y se puede representar mediante un diagrama de isobaras. Esta distribución se evaluará geométricamente a través del diámetro y la simetría del haz; es decir, permite obtener una referencia de la forma de medida del haz para la detección y dimensionado de la defectología a detectar.

Siendo X la dirección de propagación del haz e YZ un plano perpendicular a X, se definen:

- *Diámetro del haz:* Se define como el diámetro de la circunferencia inscrita ( $d_1$ ) a la isobara de -6 dB con respecto al valor máximo de presión acústica en el plano YZ. Ver figura 7.3.
- *Simetría del haz:* Es la relación entre los diámetros de las circunferencias inscrita ( $d_1$ ) y circunscrita ( $d_2$ ) a la isobara de -6 dB. Ver figura 7.3. Su objeto es evaluar si el haz decrece de igual modo en todas las direcciones o no. Cuanto más se aproxime al valor 1 esta relación, tanto más simétrico será el haz.



**Figura 7.3:** Diagrama de isobaras en un plano perpendicular a la dirección de propagación del haz. [12]

### 7.2.2 ENSAYOS PERIÓDICOS

Los llamados *ensayos periódicos* se utilizan para la evaluación de palpadores de evaluación periódica. Éstos se llevan a cabo en el correspondiente intervalo de tiempo para verificar la conservación de las características ultrasónicas del palpador a lo largo de su vida en servicio. También se deberán realizar este tipo de ensayos en palpadores que hayan sido reparados o que hayan sufrido un accidente que pudiera haber afectado a sus características ultrasónicas, como pudieran ser golpes o desoldaduras. En las sucesivas evaluaciones periódicas, los parámetros determinados en los ensayos de recepción del palpador, es decir, los valores nominales como se han denominado anteriormente, no podrán variar más de los requisitos especificados en la normativa aplicable. En caso contrario, el palpador debe ser reparado o puesto fuera de servicio.

Los parámetros que se han de evaluar mediante los ensayos periódicos realizados son, en este caso:





- **Factor de amortiguamiento (Damping):** Además de localizar los elementos del palpador que se hayan estropeado, permite detectar el deterioro del agente amortiguante que determina la resolución y el poder de penetración del haz generado.
- **Sensibilidad:** Sirve para comprobar que la homogeneidad de los elementos del palpador no se haya deteriorado durante su vida en servicio. Con ello, a partir de este ensayo se permite determinar los elementos del palpador que estén fallando.
- **Diámetro y Simetría del haz:** Detecta la variación de la forma del haz que se genera.

### 7.2.3. ENSAYOS NO PROGRAMADOS

Los ensayos no programados se han de llevar a cabo cuando sean necesarios, como por ejemplo en el caso de que se detecte un posible fallo del sistema o palpador que pueda afectar a los resultados de las inspecciones que haya que realizar. Si se requiere una reparación, se deberán comprobar todas las características que puedan ser influidas por este fallo. Como ejemplo ilustrativo, ver el apartado 5.2 del capítulo 5.

Esta evaluación será considerada como un ensayo de recepción para las características influidas. El procedimiento de evaluación deberá ser el mismo que el usado para el ensayo de recepción.





## **PROCESO EXPERIMENTAL**





## CAPÍTULO 8

# PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

### 8.1 FASE DE DESARROLLO

---

Como se indicó en el resumen inicial y en los objetivos, el fundamento del presente proyecto ha sido el desarrollo de un procedimiento concreto, acorde a la normativa aplicable interna de Airbus AITM6-0016 [1], que permita detectar la pérdida de características ultrasónicas de los palpadores de tipo Phased Array y/o instalaciones de inspección en su vida en servicio, así como aislar y evaluar los fallos detectados, y con ello mejorar la calidad de las inspecciones a realizar.

Del mismo modo, a partir de los ensayos de recepción (o también llamados de caracterización) descritos en el capítulo 7, se pretende confirmar si se adquiere realmente lo que se ha solicitado al suministrador (como puedan ser Olympus, General Electrics, etc.) y que el palpador presenta la calidad adecuada para el uso al que va a estar destinado durante su vida en servicio.

Por otro lado, debido a la multitud de elementos que componen un palpador (16, 24, 32, 64 ó 128), tipos de palpadores, etc., algunos de los requisitos indispensables para el procedimiento de evaluación son:

- *Rapidez*: Que permita la evaluación de los parámetros necesarios en tiempos ajustados para no encarecer el producto.
- *Fiabilidad*: Que reporte resultados correctos.
- *Robustez*
- *Repetitividad* de resultados

## 8.2 PUESTA A PUNTO DEL PROCEDIMIENTO

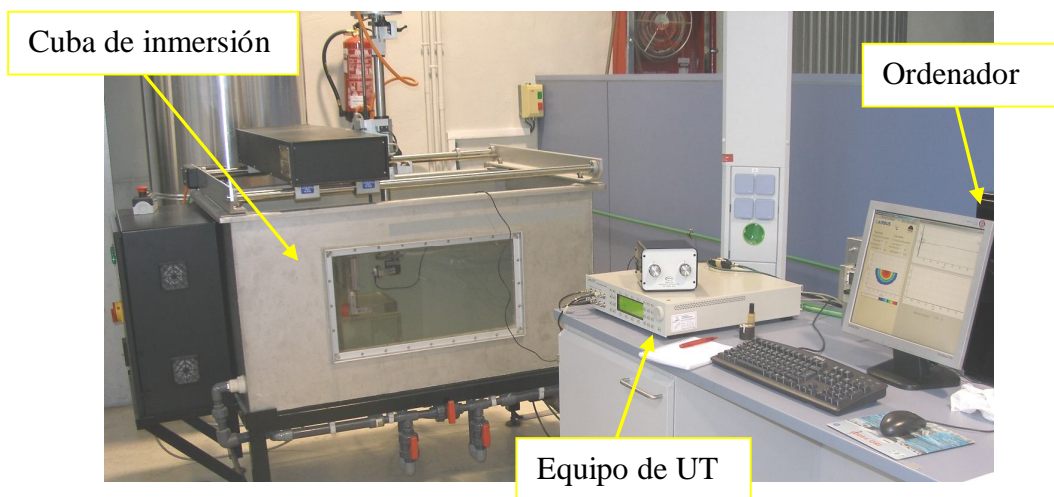
Para llegar al Procedimiento definitivo de evaluación de palpadores de Phased Array se dedicó un período de, aproximadamente, cuatro meses en horario laboral. Se realizaron muy numerosos y diferentes ensayos y pruebas hasta lograr entender el software de evaluación y el comportamiento concreto de este tipo de palpadores (que difiere bastante respecto a los de tipo convencional, por la dificultad que entrañan por su elevado número de elementos), optimizar los parámetros de trabajo, redactar la memoria del propio Procedimiento oficial y crear el modelo de informe de los resultados de la evaluación de los palpadores.

A continuación, se detallan cada una de estas partes por separado:

### 8.2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

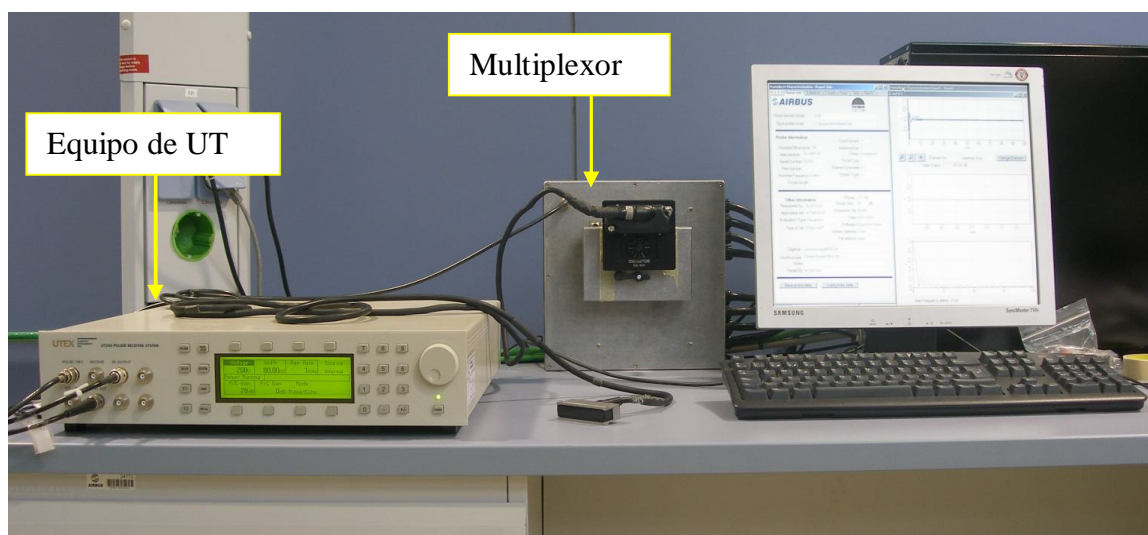
Para llevar a cabo la evaluación de un palpador de tipo Phased Array se requiere una instalación determinada con uniones entre las partes mediante cableado, así como una serie de elementos individuales que se enumeran seguidamente. Todo ello fue utilizado a la hora de la creación del Procedimiento.

- *Cuba de inmersión con cinco ejes*, (tres de traslación y dos de giro), desarrollado por la empresa Tecnitest: donde se posiciona el palpador para llevar a cabo los ensayos que se han de realizar en inmersión (Determinación de  $Y_{0+}$ , y Diámetro y simetría del haz). Ver figura 8.1 a continuación.



**Figura 8.1:** Posición de la cuba de inmersión, equipo de ultrasonidos y ordenador. [13]

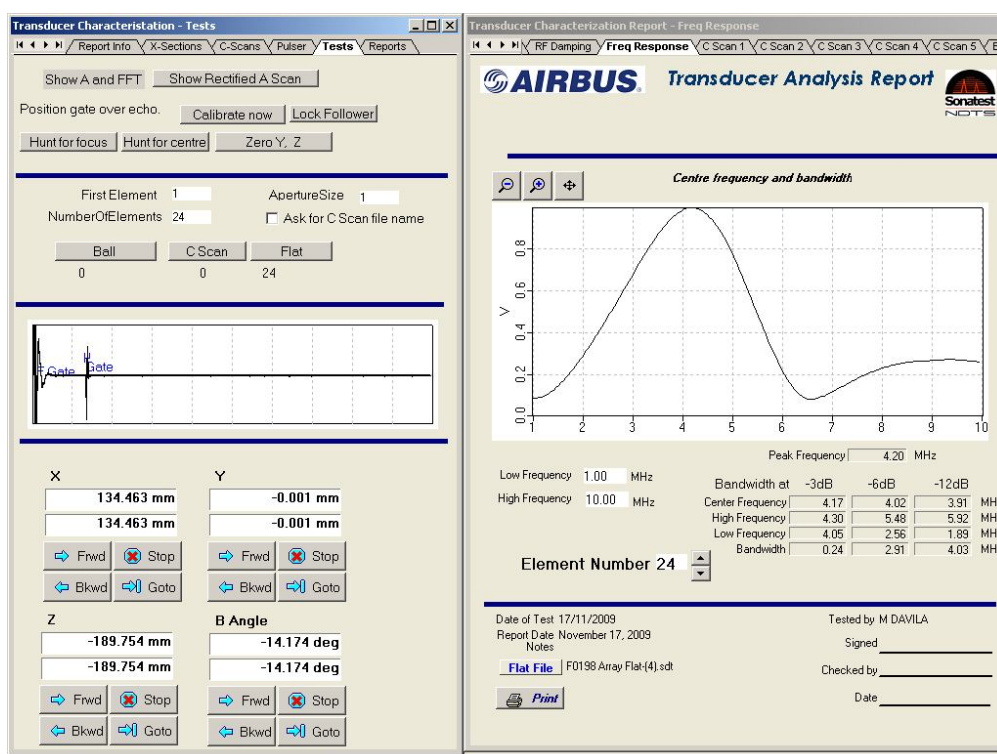
- *Multiplexor* de configuración de hasta 128 x 128 (emisores x receptores): donde se conecta el palpador Phased Array y cuya función es transmitir la señal ultrasónica desde éste hasta los equipos, y viceversa. Puede observarse en la figura 8.2.
- *Equipos de ultrasonidos (UT)*, que generan la señal ultrasónica que emite el palpador. Existen dos opciones posibles: el equipo UTEX modelo UT-340 y el USN 60 de la empresa Krautkramer. Puede usarse cualquiera de los dos, indistintamente, sin más que cambiar los parámetros en el mismo. El primero de los modelos puede observarse en la figura 8.1 anterior y en la 8.2.



**Figura 8.2:** Detalle de la posición del equipo de ultrasonidos, multiplexor y ordenador. [13]

- *Patrones* esféricos y planos fabricados en acero y metacrilato, de acuerdo a la norma aplicable.
- *Llave USB*, necesaria para abrir el software de evaluación específico para este tipo de palpadores.
- *Masa* estándar (700 g), colocada normalmente sobre el palpador durante el ensayo de Análisis en frecuencia para garantizar un contacto íntimo y una distribución homogénea de la fuerza entre el palpador y la placa de metacrilato en el momento de la medida.

- *Ordenador con el Software de evaluación* creado por la empresa UTEX para palpadores convencionales. Sonatest, bajo especificaciones de Airbus, lo modificó para evaluar palpadores Phased Array. Este software consta de una primera pantalla en la que se encuentra el menú principal del programa y donde se pueden modificar varios aspectos del programa. Además, contiene otras dos ventanas específicas para llevar a cabo la evaluación (“Transducer Characterization” y “Transducer Characterization Report”), estando una de ellas destinada a modificar los parámetros y especificar las coordenadas en los diferentes ensayos y la otra a mostrar los resultados de los mismos. Ambas constan de una serie de pestañas dedicadas a cada uno de los ensayos a realizar. En la figura 8.3 se puede observar un ejemplo de estas dos ventanas:

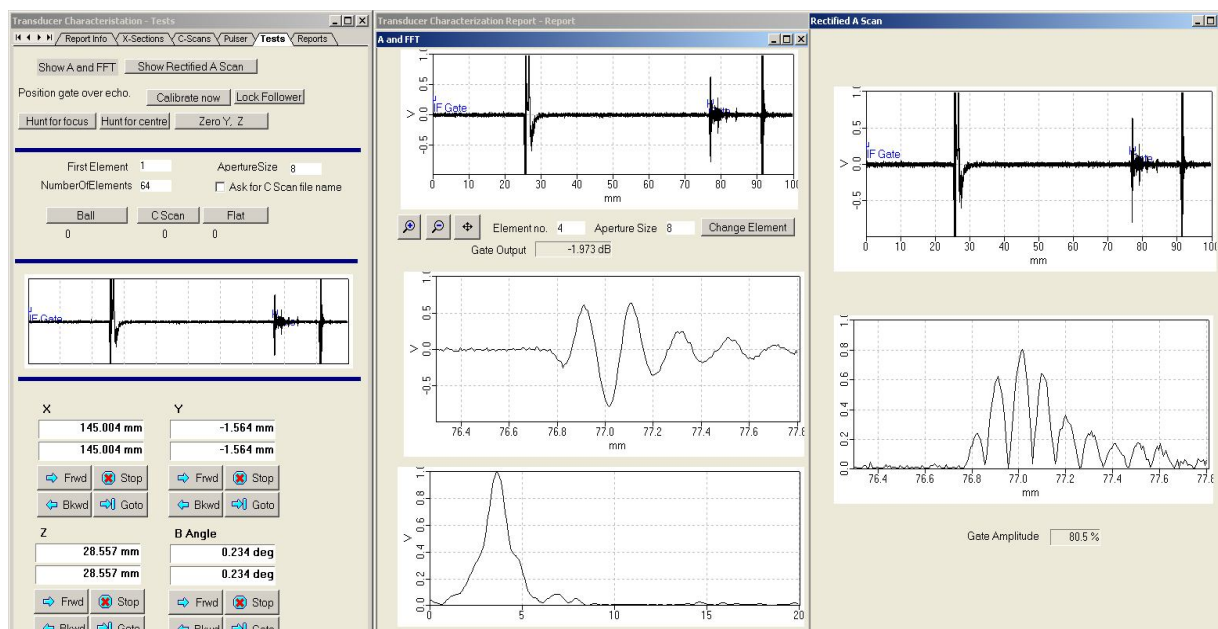


**Figura 8.3:** Ejemplo de ventanas “Transducer Characterization” y “Transducer Characterization Report” del software de evaluación. [13]

En la pestaña “Tests” de la ventana “Transducer Characterization” se encuentran dos iconos en la parte superior, los cuales, al hacer click sobre ellos, despliegan sendas ventanas donde se observa la señal ultrasónica generada por



el palpador; una muestra dicha señal rectificada y la otra esta señal y su transformada de Fourier. Ver figura 8.4 a continuación.



**Figura 8.4:** Ejemplo de ventanas “A and FFT” y “Rectified A Scan” del software de evaluación. [13]

Como ya se ha mencionado, en las distintas pestañas de la ventana “Transducer Characterization” se van modificando los parámetros necesarios a la hora de realizar cada uno de los ensayos durante el proceso de evaluación de los palpadores, tanto en contacto como en inmersión (explicado en el capítulo 7 del presente proyecto), siguiendo los pasos indicados en el Procedimiento. Y, al finalizar estos ensayos, en las pestañas de la ventana “Transducer Characterization Report” se recogen los resultados que se incluirán en el informe de evaluación de los palpadores.

## 8.2.2. ENSAYOS REALIZADOS

Durante la primera etapa del tiempo dedicado al desarrollo del Procedimiento se estuvieron realizando diferentes pruebas y ensayos para comprender el funcionamiento del software aplicado a los palpadores tipo Phased Array y fijar los pasos que había que seguir para la evaluación de los mismos, como ya se ha mencionado al inicio de este apartado 8.2.



Posteriormente, una vez adquiridos estos conocimientos, se dedicó un período de tiempo más breve que el anterior a llevar a cabo diversas pruebas con el fin de optimizar los ensayos y los resultados a conseguir. Con esto se lograron sacar varias conclusiones que se explicarán a continuación.

#### **8.2.2.1 ENSAYOS DESTINADOS AL ANÁLISIS EN FRECUENCIA: MATERIAL, INTERVALO DE FRECUENCIA Y MODO**

En el momento de llevar a cabo la prueba del Análisis en Frecuencia de los palpadores Phased Array, hay que hacer una distinción entre ellos, dado el Procedimiento:

- *Palpadores de contacto*: son aquéllos que van a trabajar en sistemas manuales o semiautomáticos y que, empleando una capa intermedia de gel acoplante que ajuste las impedancias de los medios, entran en contacto íntimo con el material o pieza a inspeccionar. Para este tipo de palpadores, el Análisis en Frecuencia se hace fuera de la cuba de inmersión y empleando en su lugar una placa patrón de PMMA, como se verá seguidamente.
- *Palpadores de inmersión*: son los que, en su vida en servicio, van a trabajar sumergidos completamente en un medio acuoso, con columna de agua, o con un medio de acoplamiento semirígido o rígido. En este caso, el Análisis en Frecuencia se habrá de realizar dentro de la cuba de inmersión.

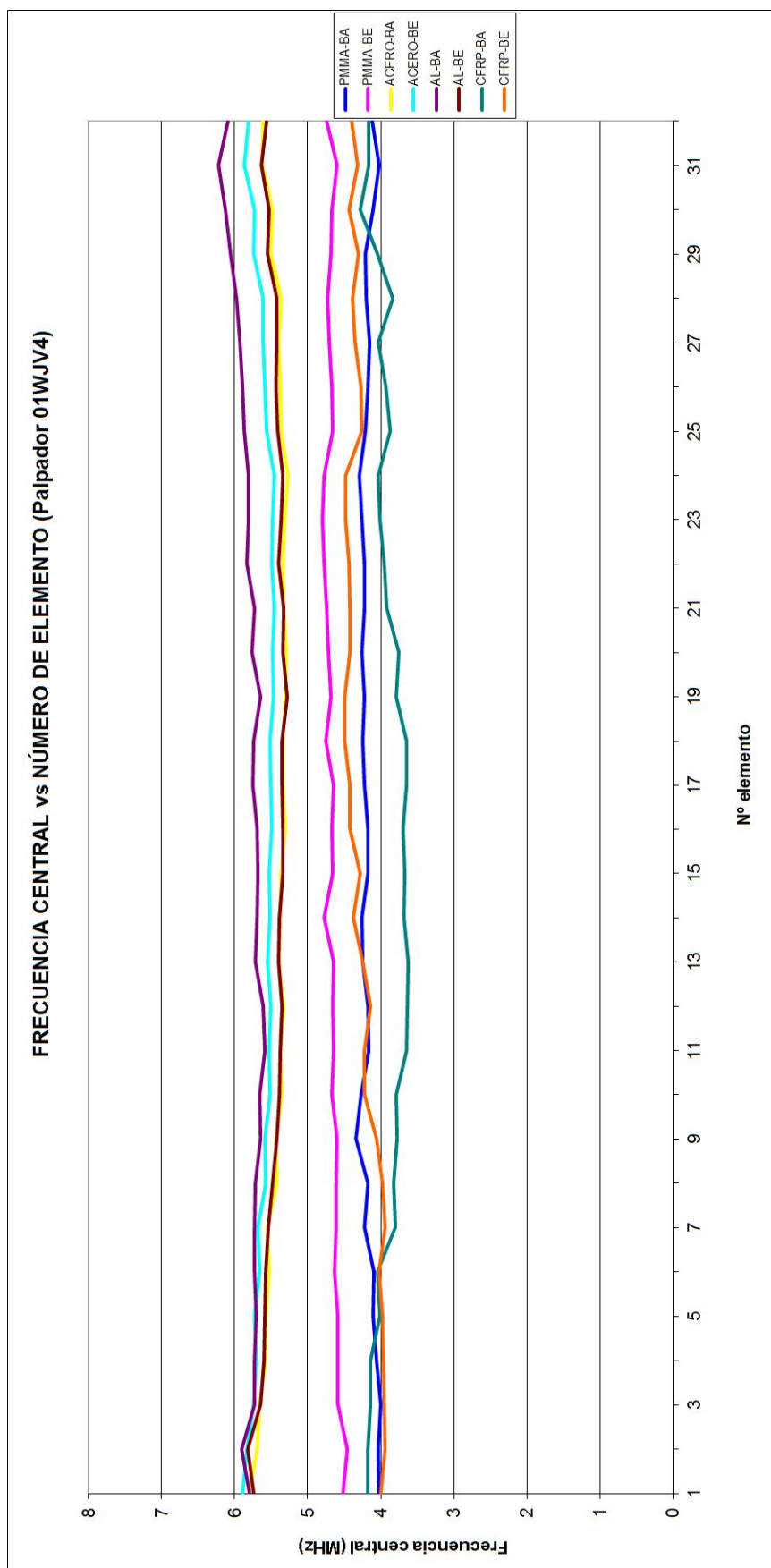
Debido a que la mayor parte de los palpadores que se evalúan son de contacto, nos centraremos en las conclusiones que se obtuvieron a partir de los ensayos realizados sobre los mismos.

Las posibilidades que existen a la hora de llevar a cabo la prueba del Análisis en Frecuencia para este tipo de palpadores son variadas, siendo éstas las que se indican a continuación, y las cuales se utilizaron para realizar los diversos ensayos en el desarrollo del presente proyecto:

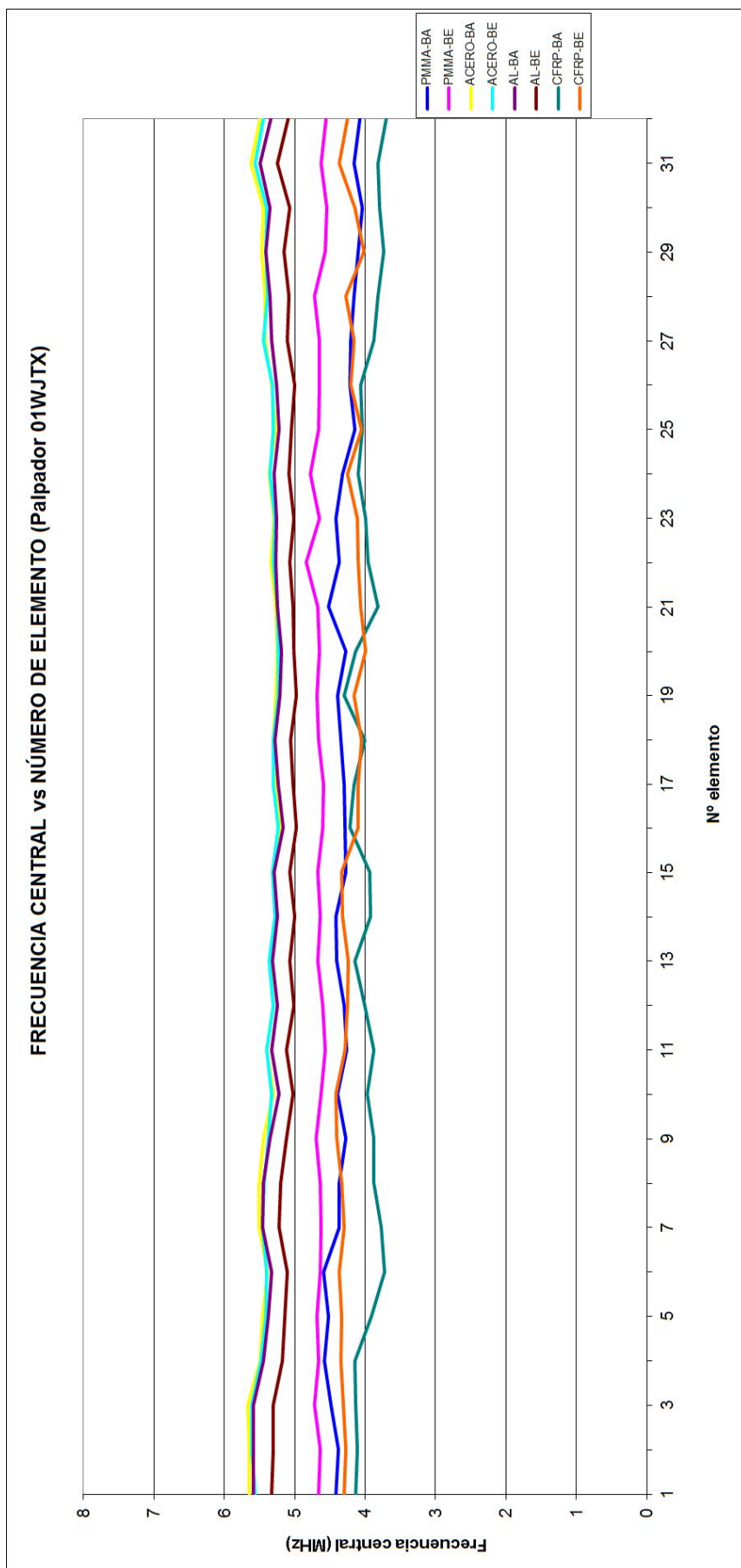


- En cuanto a la frecuencia a emplear en el equipo de ultrasonidos existen dos opciones: Banda Ancha, BA, (normalmente de 2 a 30 MHz porque aporta mejores resultados) o Banda Estrecha, BE, (usualmente 5 MHz, la frecuencia más cercana a la nominal del palpador).
- En lo referente al material: sobre acero, PMMA, aluminio o CFRP, que son los más extendidos en el sector aeronáutico.

Los ensayos realizados en este proyecto consistieron en un total de dieciséis pruebas de Análisis en Frecuencia, una para cada una de las ocho combinaciones posibles de frecuencias y materiales que se han enumerado, y empleando dos palpadores Phased Array de 32 elementos. Para realizar dichas pruebas, se posicionaron los palpadores en contacto sobre bloques patrón de cada uno de los diferentes materiales, se seleccionó en el equipo de ultrasonidos la frecuencia a utilizar en cada caso y, mediante software, se llevaron a cabo las pruebas de Análisis en Frecuencia. *(No es posible entrar en más detalle debido a la confidencialidad que exige la empresa)*. A continuación se presentan las figuras 8.5 y 8.6 que muestran los resultados obtenidos al realizar este ensayo: en ellas se compara la frecuencia central de cada uno de los 32 elementos que compone cada palpador para las ocho combinaciones posibles de materiales y de frecuencia, pudiéndose apreciar que para ambos palpadores se obtienen resultados similares.



**Figura 8.5:** Comparativa de la frecuencia central de cada uno de los elementos del palpador 1 en función del modo de ensayo.



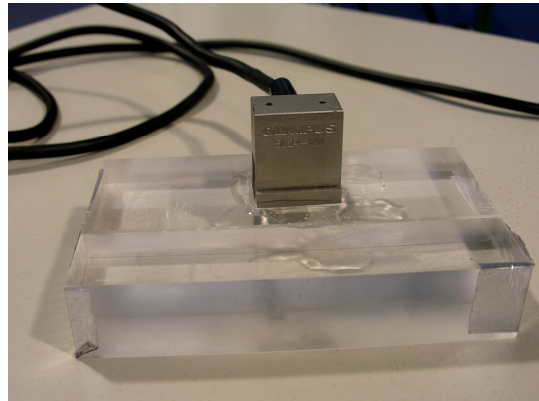
**Figura 8.6:** Comparativa de la frecuencia central de cada uno de los elementos del palpador 2 en función del modo de ensayo.



Si se analizan las figuras anteriores se puede observar que:

- En cuanto al *intervalo de frecuencias* a utilizar, el resultado no es concluyente, dado que en unos casos en banda ancha se aproxima más a la frecuencia nominal del palpador (5 MHz) que en banda estrecha, ocurriendo lo contrario en otras ocasiones. En la práctica, normalmente se empleará banda ancha para realizar la evaluación de estos palpadores debido al mayor rango de frecuencias que abarca.
- En lo referente al *material* empleado, es de gran interés la demostración que se hace de que el patrón de PMMA (figura 8.7), empleado para el análisis en frecuencia de los palpadores, es totalmente válido para obtener unos resultados aplicables a las inspecciones de componentes fabricados con CFRP: a la vista de las gráficas, para los dos palpadores se han obtenido frecuencias medias en estos dos materiales por encima de 4 y sin llegar a 5 MHz, siendo resultados satisfactorios, acordes a la normativa aplicable. Por ello, se puede afirmar que el material a emplear en esta prueba en las evaluaciones de palpadores Phased Array de contacto será PMMA, que es un reflector puro y muy homogéneo. En la realidad no se utiliza CFRP para este tipo de ensayos, dada la gran variedad de composiciones de este material en la fabricación de los elementos que se emplean en los diferentes aviones que fabrica la empresa. Por lo tanto, se busca un material que sea lo más parecido al CFRP en las propiedades físicas que interesan en este caso y cuya composición sea homogénea, resultando ser en este caso, PMMA.

Cabe destacar que, con los patrones de acero y aluminio, se obtiene una frecuencia media algo mayor que para el caso del CFRP, no tan cercana a ésta como el PMMA, por lo que se puede concluir que estos dos materiales no son los más apropiados para realizar esta prueba.



**Figura 8.7:** *Modo definitivo de realizar el ensayo de Análisis en frecuencia para palpadores de contacto.* [13]

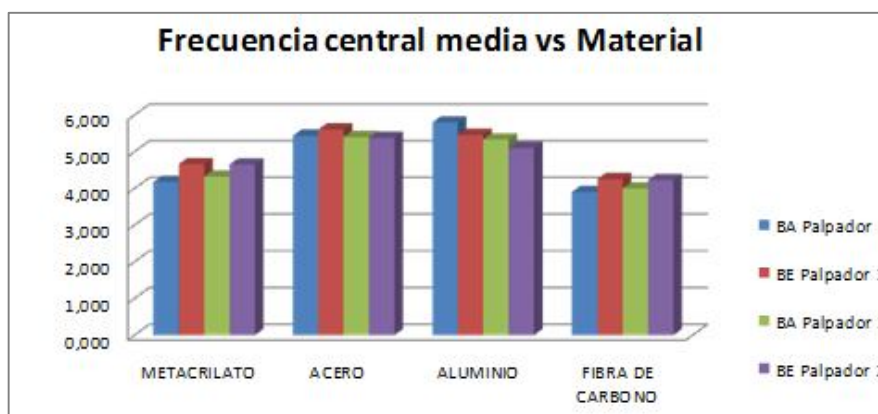
Junto con las gráficas anteriores, en las tablas 8.1 y 8.2 y figura 8.8 se presentan los resultados obtenidos en el análisis en frecuencia realizado. En ellas aparecen representados los distintos materiales empleados como reflector, así como las dos condiciones de ensayo en cuanto a frecuencia: banda ancha y banda estrecha. La ganancia que aparece reflejada es la que se necesita aportar al equipo de ultrasonidos para obtener una señal de, aproximadamente, el 99% de altura de pantalla en el mismo, es decir, que el eco generado en el equipo tenga la máxima altura posible, pero sin llegar a saturación de la señal.

01WJV4 Palpador 1				
	BANDA ANCHA 2-30 MHz		BANDA ESTRECHA (5 MHz)	
	Ganancia (dB)	Frec. Central media (Mhz)	Ganancia (dB)	Frec. Central media (Mhz)
METACRILATO	55	4,178	55	4,665
ACERO	53	5,437	52	5,607
ALUMINIO	43	5,801	45	5,460
FIBRA DE CARBONO	63	3,904	61	4,254

**Tabla 8.1:** *Comparativa de ganancia y frec. central media en los diferentes casos para el palpador 1.*

01WJTX Palpador 2				
	BANDA ANCHA 2-30 MHz		BANDA ESTRECHA (5 MHz)	
	Ganancia (dB)	Frec. Central media (Mhz)	Ganancia (dB)	Frec. Central media (Mhz)
METACRILATO	55	4,324	56	4,653
ACERO	53	5,398	53	5,380
ALUMINIO	47	5,334	50	5,102
FIBRA DE CARBONO	60	4,000	62	4,226

**Tabla 8.2:** *Comparativa de ganancia y frec. central media en los diferentes casos para el palpador 2.*



**Figura 8.8:** Gráfica comparativa de frecuencia central media en los diferentes casos para ambos palpadores.

En las tablas se observa que la ganancia necesaria para lograr las condiciones deseadas es mayor para los dos palpadores y en ambas frecuencias para el caso de CFRP, y la menor de todos los materiales para el aluminio. Por otro lado, no es concluyente que en banda ancha se necesite un mayor aporte de ganancia que para banda estrecha, o viceversa. En la figura 8.8 se muestra la frecuencia central media que se consigue del ensayo para ambos palpadores, en las diferentes condiciones de bandas de frecuencia y materiales: como ya se comentó, la frecuencia media obtenida empleando PMMA es similar a la de CFRP (aproximadamente entre 4 y 5 MHz), siendo mayor de 5 MHz para acero y aluminio.

### 8.2.2.2 ENSAYOS DESTINADOS AL DIÁMETRO Y SIMETRÍA DEL HAZ

#### A. Apertura del haz

El siguiente aspecto a analizar es cómo se comporta el haz si proviene de un elemento individual o de varios en conjunto; y, si es en este último caso, cuál es el número de elementos de un grupo (apertura) que consigue que la señal sea máxima para una menor ganancia aportada al equipo de ultrasonidos, es decir, la apertura que optimiza la señal.

A continuación, en las figuras de la 8.9 a la 8.15, se muestran los resultados obtenidos al realizar esta prueba mediante software sobre un palpador de contacto cualquiera de 64 elementos, en banda ancha y enfrentándolo a un reflector esférico de acero de 3 mm de diámetro (acorde a la normativa aplicable) introducido en la cuba de inmersión, empleando diferentes aperturas, desde 1 hasta 12 elementos, y maximizando la señal ultrasónica en el elemento que constituye el centro del haz.





a) **Apertura 1 (1 elemento)**

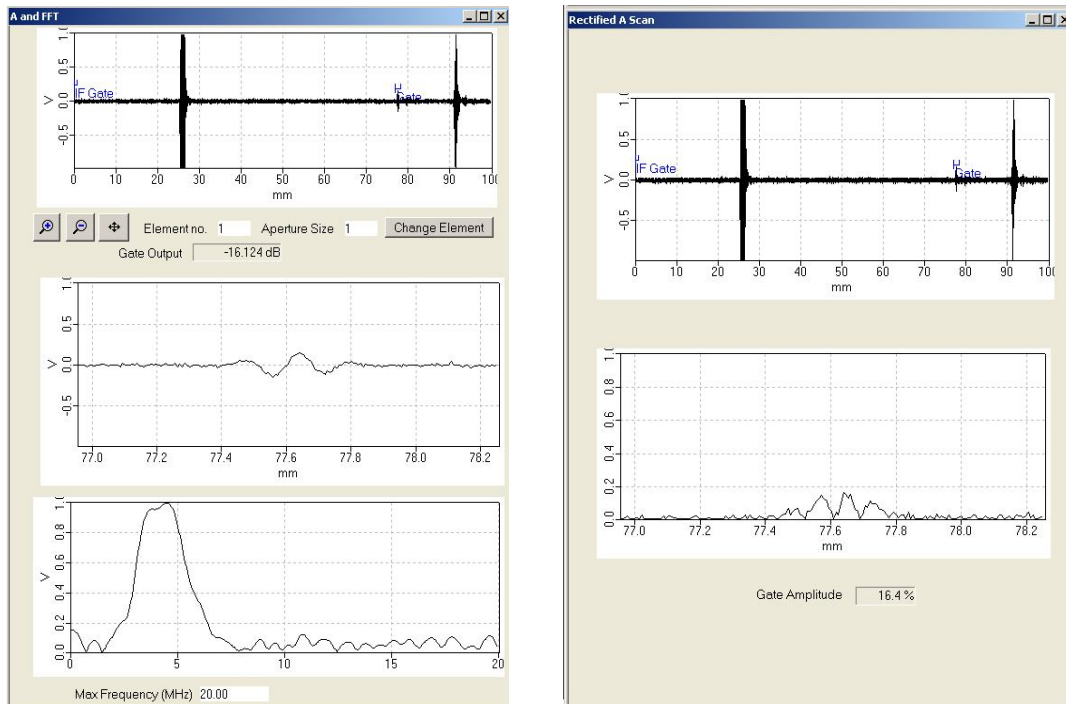


Figura 8.9: Ventanas “A and FFT” y “Show Rectified A Scan” para una apertura de 1 elemento.

b) **Apertura 2 (2 elementos)**

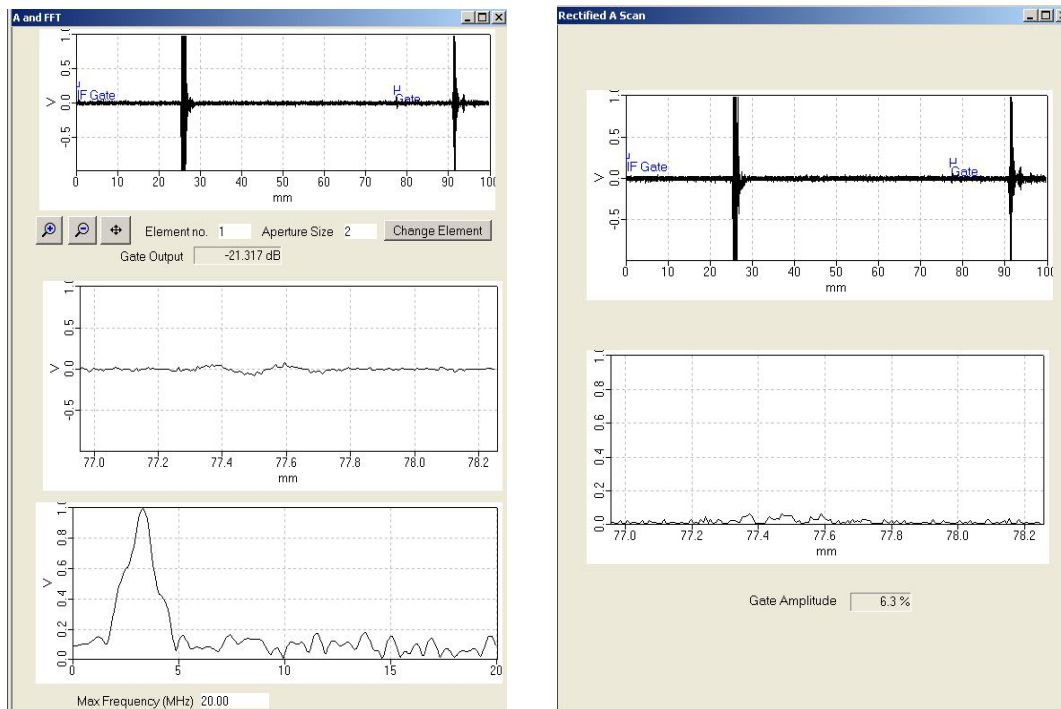
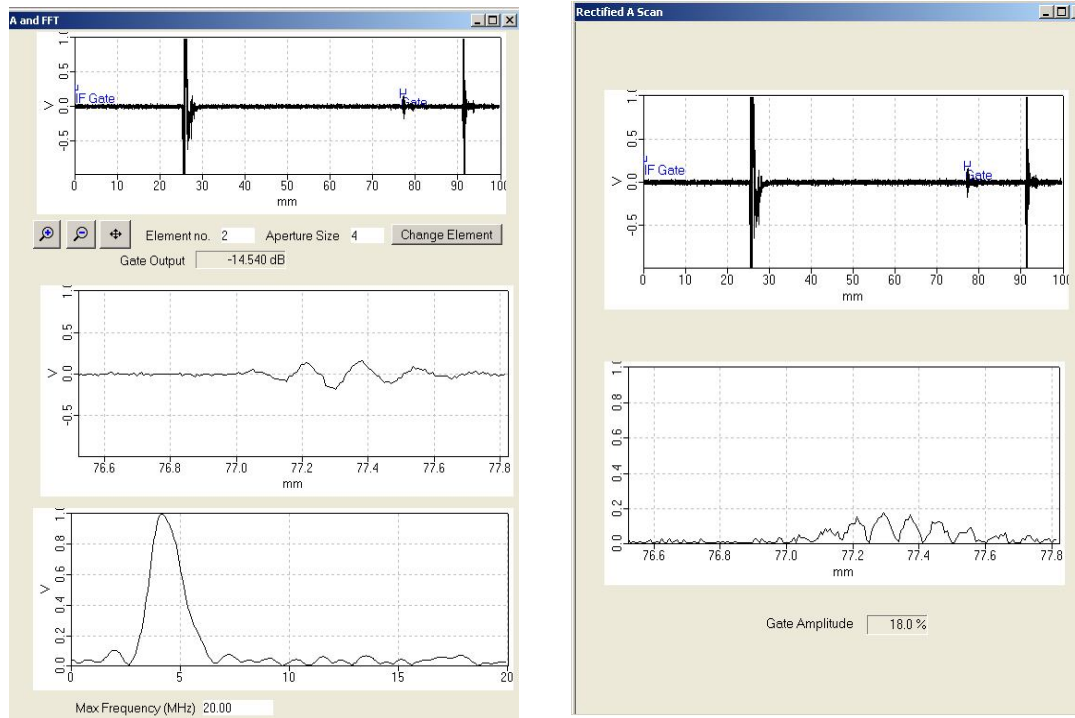


Figura 8.10: Ventanas “A and FFT” y “Show Rectified A Scan” para una apertura de 2 elementos.

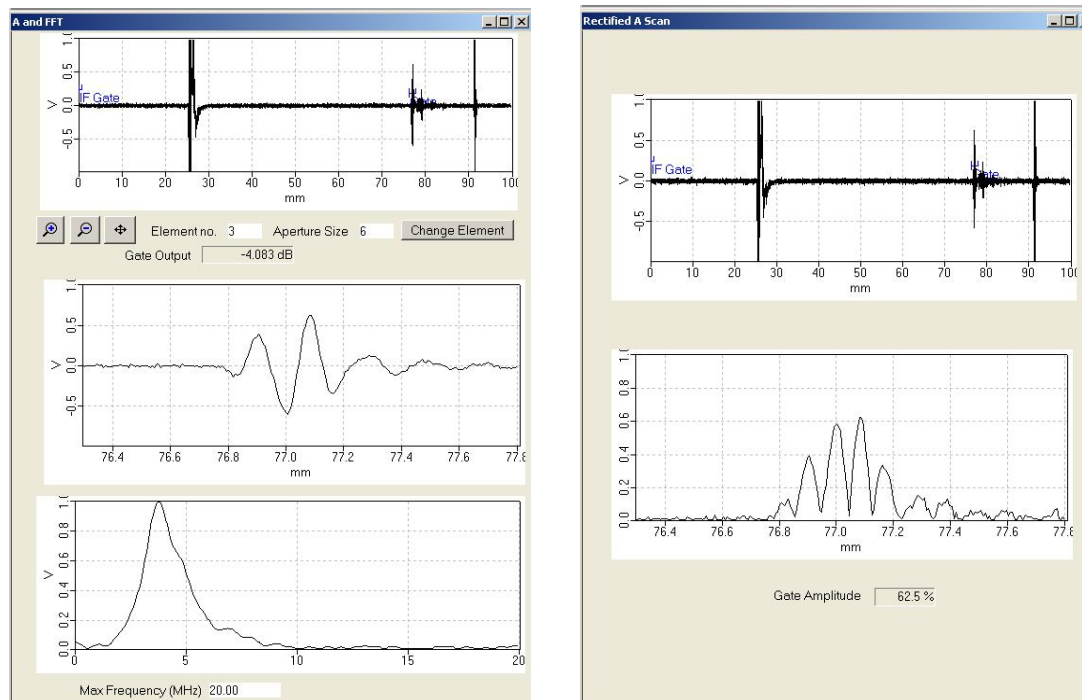


**c) Apertura 4 (4 elementos)**



**Figura 8.11:** Ventanas “A and FFT” y “Show Rectified A Scan” para una apertura de 4 elementos.

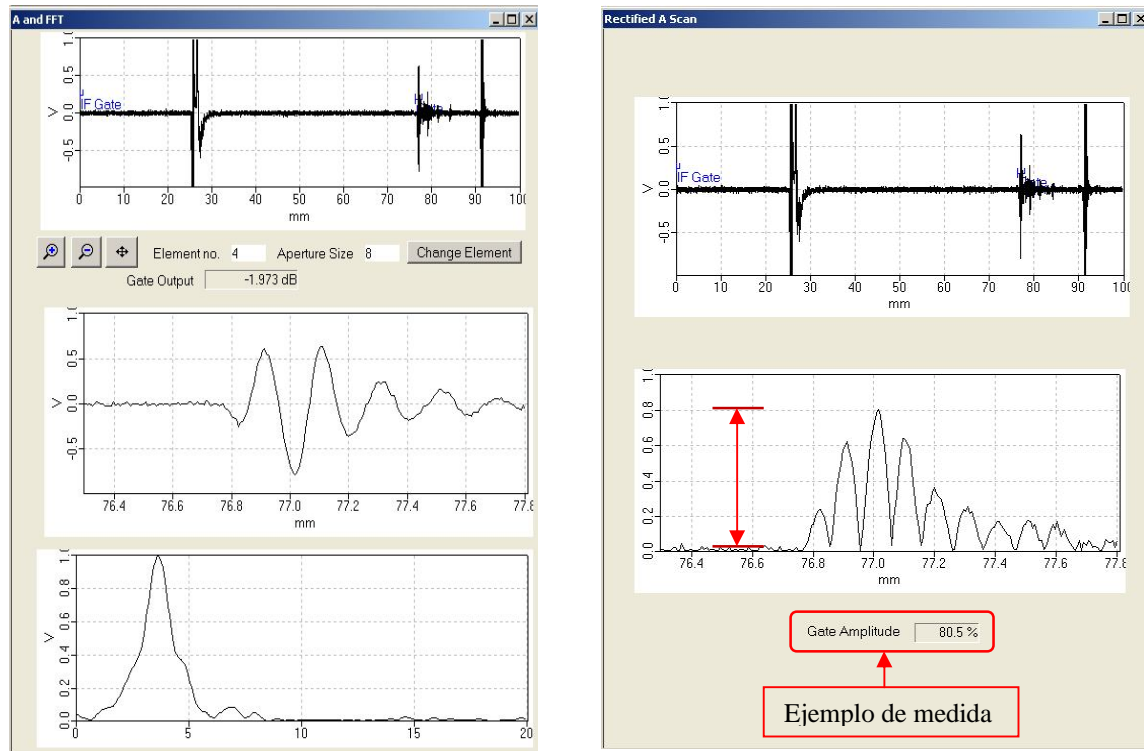
**d) Apertura 6 (6 elementos)**



**Figura 8.12:** Ventanas “A and FFT” y “Show Rectified A Scan” para una apertura de 6 elementos.

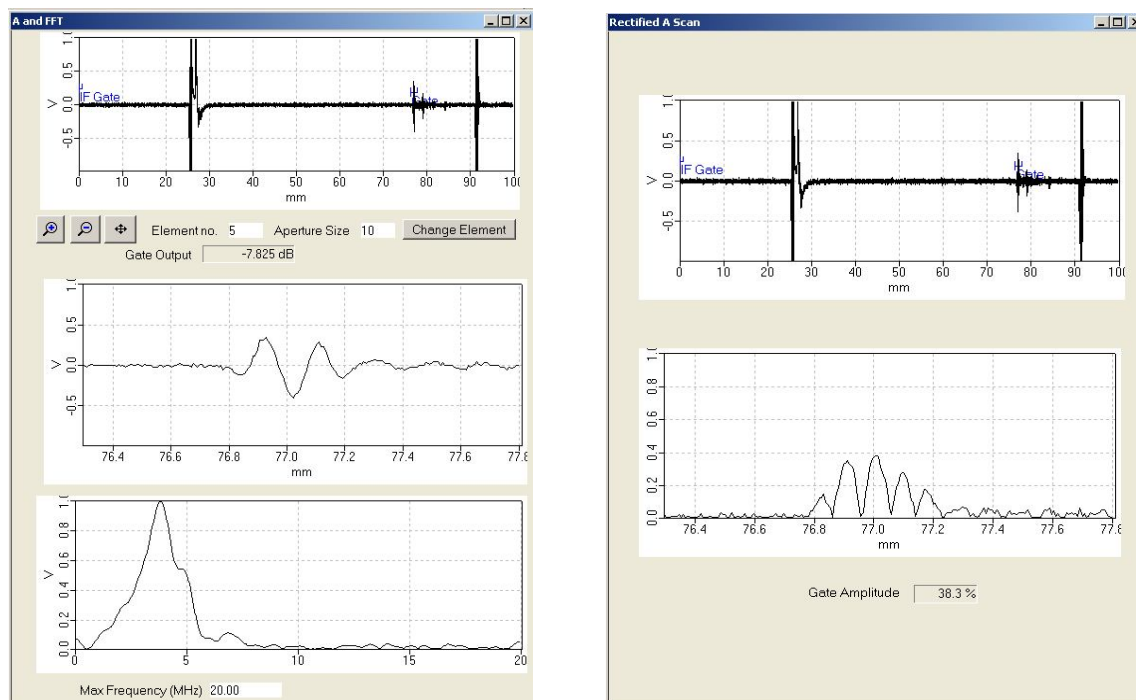


**e) Apertura 8 (8 elementos)**



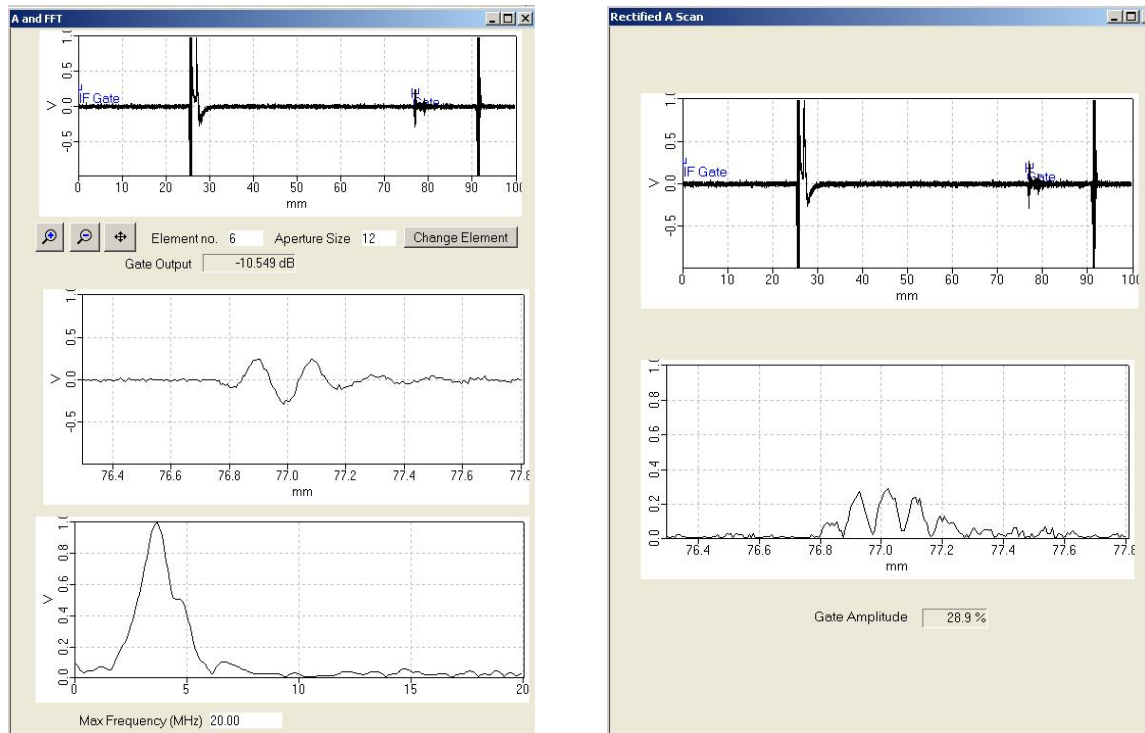
**Figura 8.13:** Ventanas “A and FFT” y “Show Rectified A Scan” para una apertura de 8 elementos.

**f) Apertura 10 (10 elementos)**



**Figura 8.14:** Ventanas “A and FFT” y “Show Rectified A Scan” para una apertura de 10 elementos.

**g) Apertura 12 (12 elementos)**

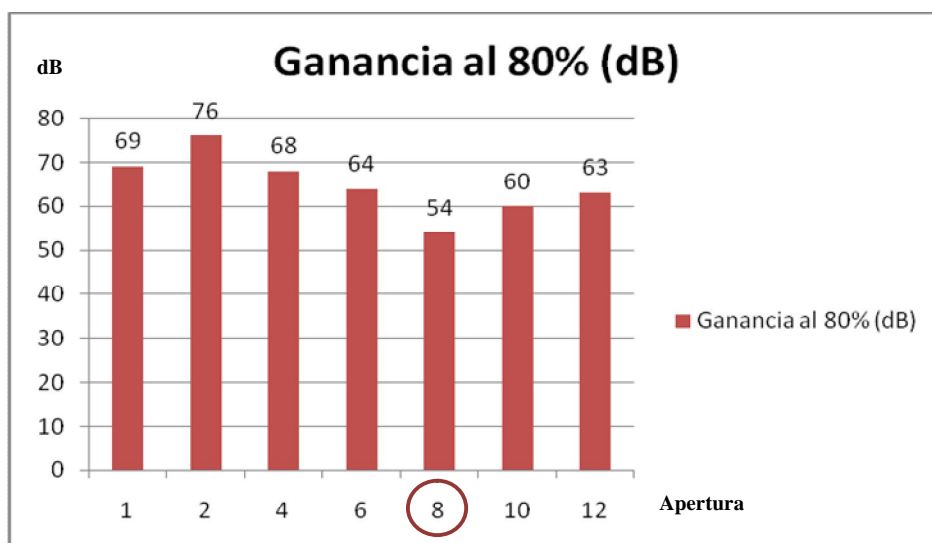


**Figura 8.15:** Ventanas “A and FFT” y “Show Rectified A Scan” para una apertura de 12 elementos.

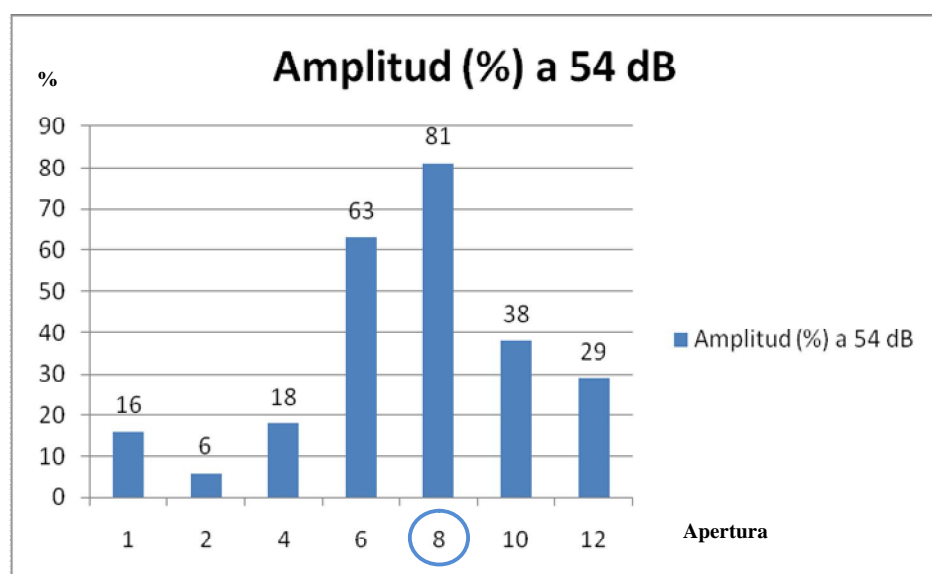
En la tabla 8.3 y figuras 8.16 y 8.17 se presentan los resultados obtenidos en los anteriores ensayos a diferentes aperturas. En todos los casos considerados se recoge la ganancia (expresada en decibelios) que es necesario aportar al equipo de ultrasonidos para conseguir una señal del 80% de altura de pantalla, así como la amplitud en tanto por ciento (ver figura 8.13) a la que se llega aplicando una ganancia de 54 dB (ésta es la requerida para que el haz de 8 elementos, tomado como referencia, consiga una señal del 80% de pantalla).

Apertura	Elemento	Ganancia al 80% (dB)	Amplitud (%) a 54 dB
1	1	69	16
2	1	76	6
4	2	68	18
6	3	64	63
<b>8</b>	<b>4</b>	<b>54</b>	<b>81</b>
10	5	60	38
12	6	63	29

**Tabla 8.3:** Resumen de resultados obtenidos en los ensayos de aperturas.



**Figura 8.16:** *Ganancia (dB) necesaria para situar las señales al 80% de pantalla.*



**Figura 8.17:** *Amplitud (%) conseguida para los diferentes haces a 54 dB.*

Como puede observarse de las figuras anteriores, la apertura óptima para palpadores de 64 elementos de este tipo es de 8 elementos: para obtener una señal de aproximadamente el 80% de altura en pantalla se necesita menor ganancia que para el resto de aperturas, 54 dB. En definitiva, con una apertura de 8 elementos se obtiene una mayor amplitud de señal que para el resto de aperturas, para una misma ganancia aportada por el equipo. Este resultado es



extrapolable a palpadores de diferente número de elementos; aunque conviene que en la evaluación de cada palpador se compruebe este parámetro.

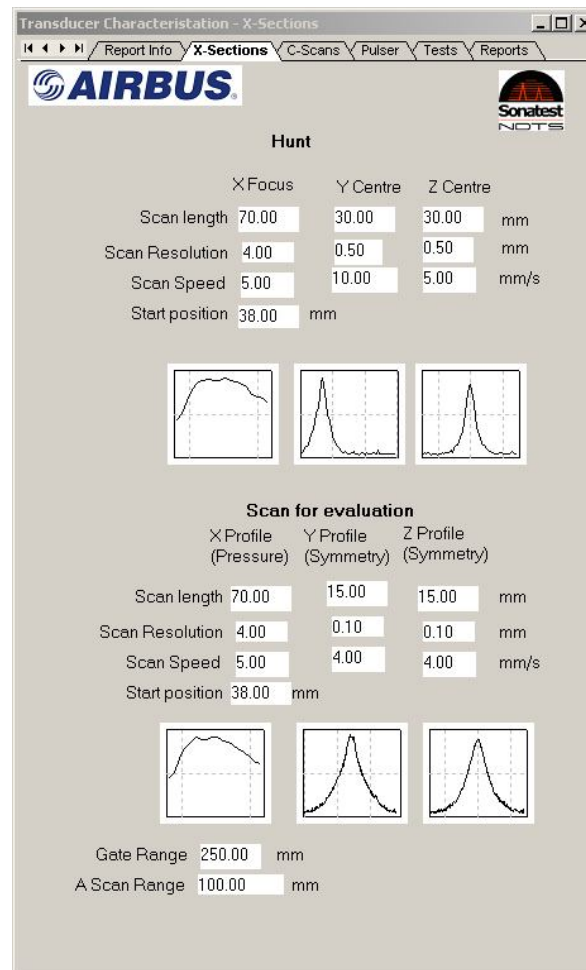
Ésta también es la apertura de trabajo típica utilizada en los diversos centros para realizar las inspecciones de los elementos necesarios fabricados con material compuesto. En el caso de que, en las inspecciones a desarrollar, se empleara otra apertura diferente de la de evaluación, habría que volver a llevar a cabo ésta utilizando tal apertura.

### **B. Elección de la distancia de trabajo óptima**

El siguiente ensayo a realizar dentro de los destinados al Diámetro y Simetría del haz es la elección de la distancia de trabajo óptima a la que se debe colocar el palpador para realizar las pruebas de inmersión. Para ello se posicionó un palpador cualquiera (en concreto, para este ensayo se empleó un palpador de 24 elementos) dentro de la cuba de inmersión enfrente con el reflector esférico de acero de 3 mm de diámetro (según la normativa aplicable) y, mediante el software de evaluación, se calculó primeramente  $Y_{o+}$ , o punto de máxima presión acústica del haz generado por el palpador. Una vez conocida esta distancia, se pasaron a realizar los ensayos de Diámetro y Simetría del haz, mediante software, a diferentes distancias: a  $Y_{o+}$ , en campo cercano, en campo lejano en dos cotas distintas y en campo lejano aumentando la ganancia respecto al caso anterior. Estos ensayos realizados y los resultados obtenidos a partir de ellos se detallan a continuación:

#### **a) A $Y_{o+}$ :**

Para realizar la prueba a esta distancia se empleó una ganancia en el equipo de 54 dB, la necesaria para conseguir una amplitud de señal ultrasónica del 95% aproximadamente de altura de pantalla. Los parámetros usados fueron los mostrados en la figura 8.18:



**Figura 8.18:** *Parámetros empleados para calcular el punto de máxima presión acústica, Yo+.*

El resultado, obtenido en la ventana “Transducer Characterization Report” del software de evaluación, mostrado en la figura 8.19, es de 49 mm, por lo que se fija la distancia de trabajo a partir de ahora a 50 mm para la realización de los ensayos.

Nota: Se debe tener en cuenta que a la distancia que aparece en la ventana de resultados de la figura 8.19 se ha de restar la distancia inicial distinta de cero, tomada como origen de coordenadas, que tiene el palpador al enfrentarse perfectamente con el reflector esférico, siendo ésta entonces la coordenada X del punto de máxima presión acústica. En este caso, a 72.667 mm se han de restar 23.667 mm como distancia inicial que aparece en el programa al enfrentar el palpador con el reflector esférico, resultando una distancia de trabajo final de unos 49 mm.

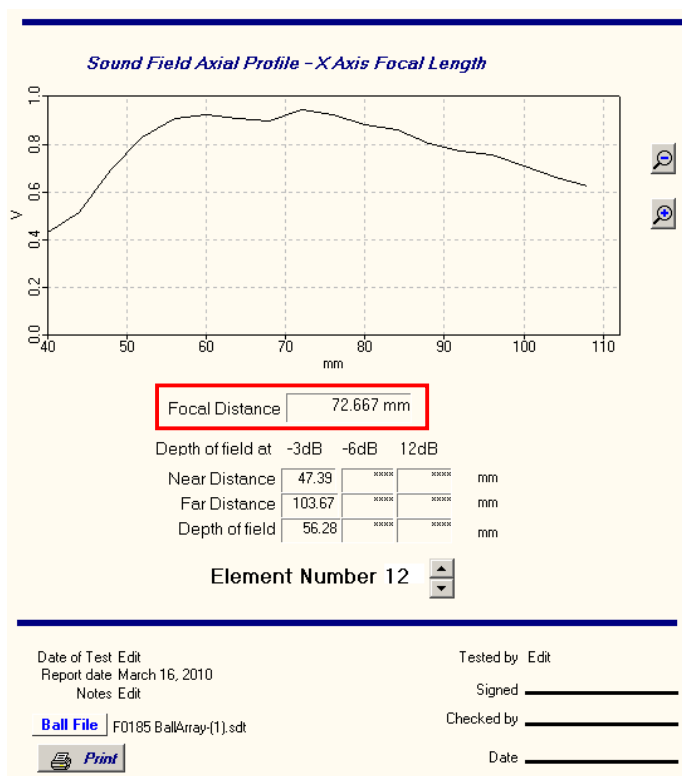


Figura 8.19: Resultado del cálculo del punto de máxima presión acústica del palpador.

La simetría y diámetro del haz resultantes de este ensayo, para el palpador de 24 elementos empleado, fueron los recogidos en la tabla 8.4. Para esta prueba se utilizó una apertura de haz de 8 elementos, la óptima como se demostró anteriormente (de ahí que se muestren los resultados de tres grupos de elementos, dado que cada uno de ellos emite por separado un haz ultrasónico con unas características de diámetro y simetría diferentes).

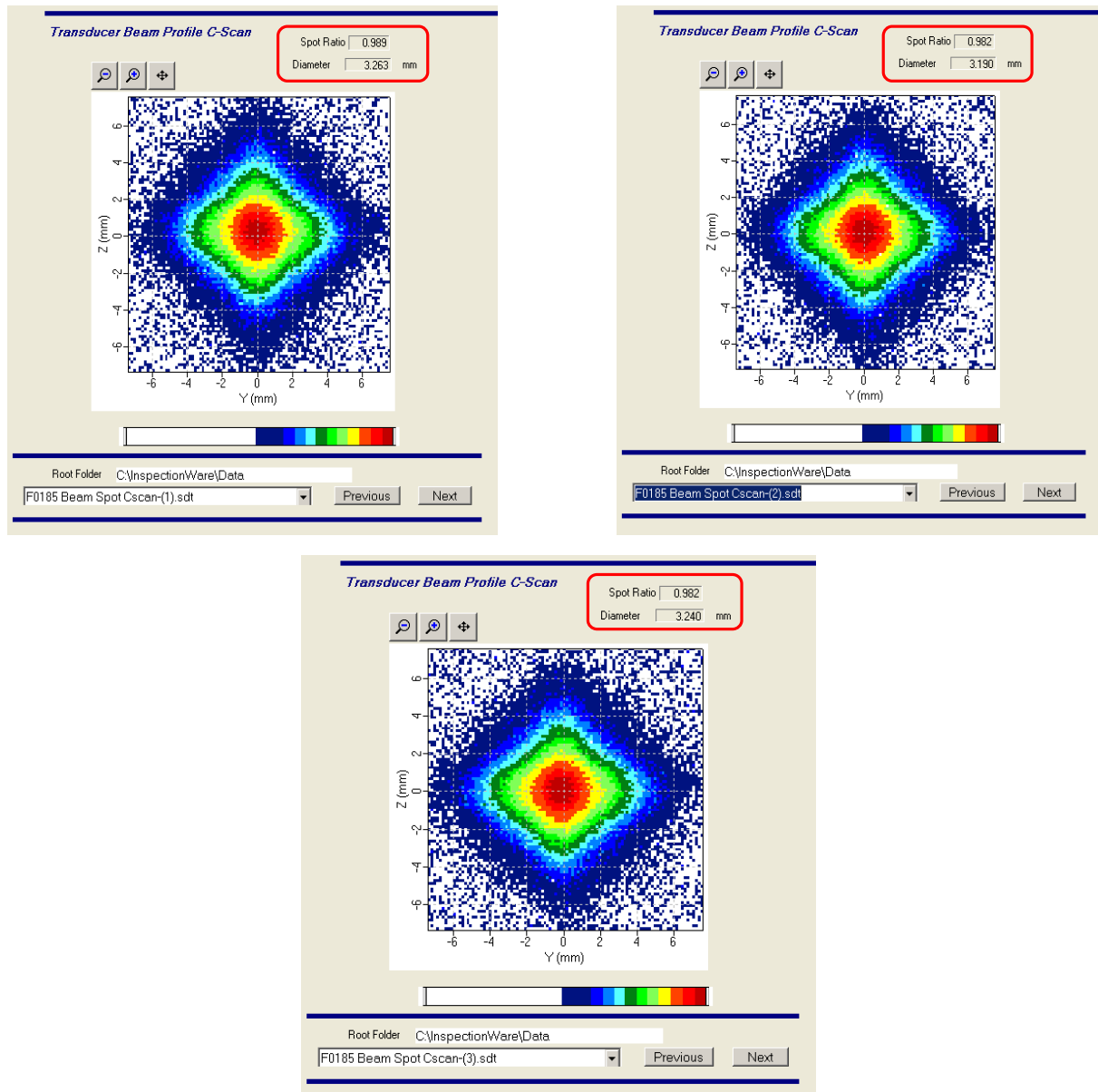
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diámetro (mm)	3.263	3.190	3.240
Simetría	0.989	0.982	0.982

Tabla 8.4: Resultado del diámetro y simetría de los haces a la distancia de  $Y_0+$ .

Estos conceptos de diámetro y simetría del haz se explicaron con detalle en el apartado 7.3.1 del capítulo anterior. El diámetro en los tres casos es muy próximo a 3 mm, diámetro real del reflector esférico, teniendo en cuenta la posible divergencia del haz ultrasónico que se produce. El valor de simetría está dentro del rango permitido por la normativa aplicable (entre 0.686 y 1), por lo que el resultado obtenido en este ensayo es correcto.



A continuación se muestran en la figura 8.20 los tres C-Scans del reflector esférico obtenidos del ensayo, uno para cada uno de los grupos. En ellos, la escala de colores indica la presión acústica del haz ultrasónico, siendo la zona roja (el centro del haz) la de mayor presión.



**Figura 8.20:** Resultado del C-Scan del reflector esférico para cada uno de los haces.

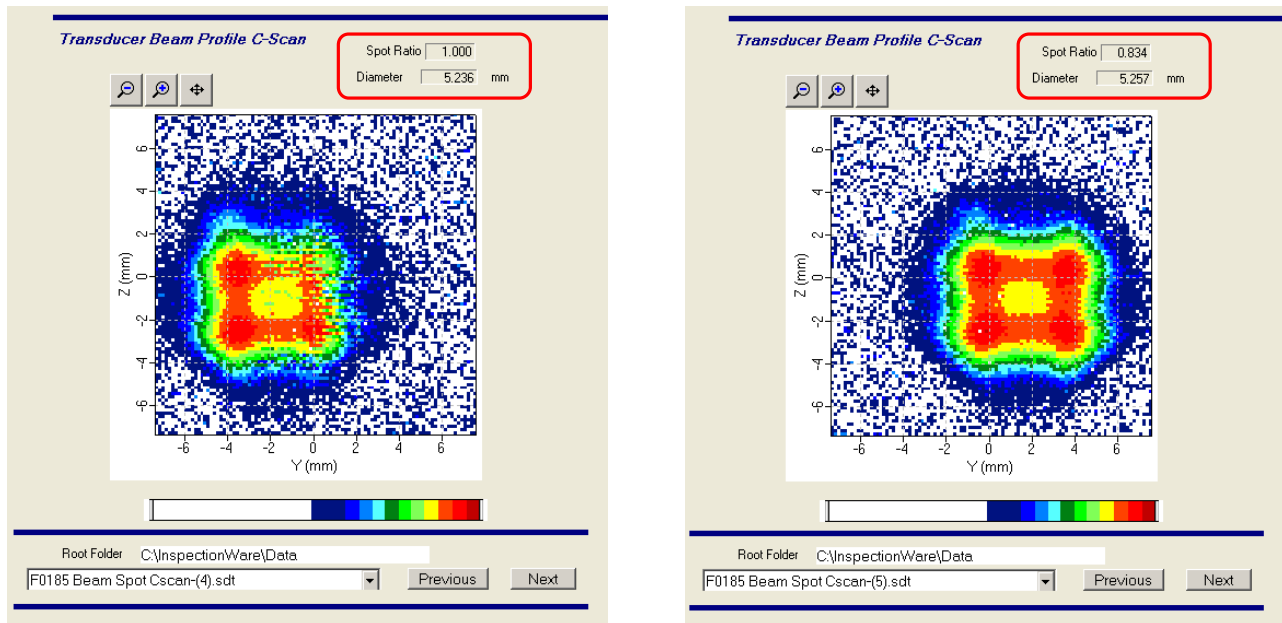
En resumen, a la vista de la figura 8.20 y de la tabla 8.4 anterior se observa que los resultados obtenidos para una distancia de trabajo igual al punto de máxima presión acústica o  $Y_0+$  cumplen con la Norma AITM6-0016 aplicable, por lo que es a esta distancia a la que deberán realizarse los ensayos, como se demostrará con los casos que siguen.

**b) En campo cercano, en zona de máximos y mínimos:**

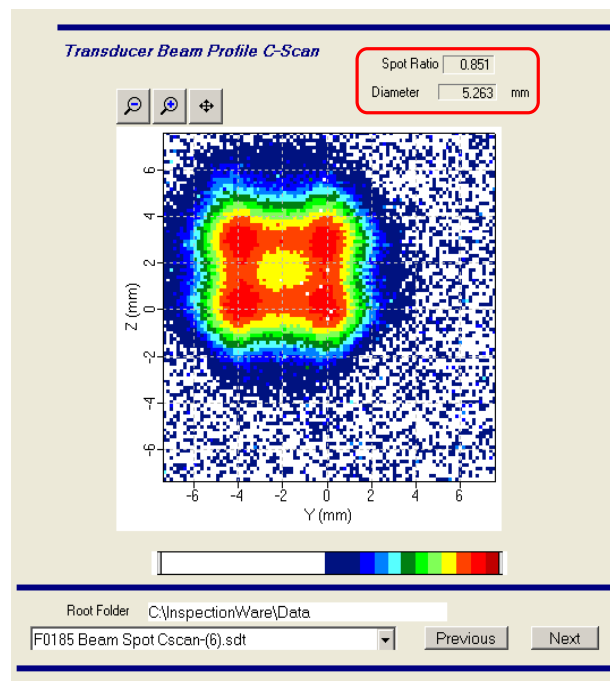
Repitiendo el ensayo anterior, esta vez a 15 mm del reflector esférico (región de campo cercano del haz ultrasónico, asegurándose de estar en zona de máximos y mínimos), con apertura de 8 elementos y ganancia de 54 dB (la misma que para el caso anterior), se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los tres grupos de elementos, recogidos en la tabla 8.5 y la figura 8.21.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diámetro (mm)	5.236	5.257	5.263
Simetría	1	0.834	0.851

**Tabla 8.5:** Resultado del diámetro y simetría de los haces en campo cercano.



**Figura 8.21:** Resultado del C-Scan del reflector esférico para cada uno de los haces.



**Figura 8.21 (cont.):** Resultado del C-Scan del reflector esférico para cada uno de los haces.

Con ello se demuestra la hipótesis previa de que saldrían varios círculos, debido a que cada uno de los picos del haz (figura 3.8) refleja en un determinado punto del reflector esférico (no teniendo por qué ser necesariamente en el centro). El valor del diámetro obtenido para los tres casos es muy alto; la imagen se distorsiona debido a los fenómenos de interferencia que provocan los máximos y los mínimos del haz ultrasónico en esta zona del campo cercano. Por otro lado, cabe destacar que, aunque el resultado de simetría sea correcto por estar dentro de los límites establecidos por la Norma AITM6-0016 [1], los C-Scans salen totalmente descentrados, descartando así su validez.

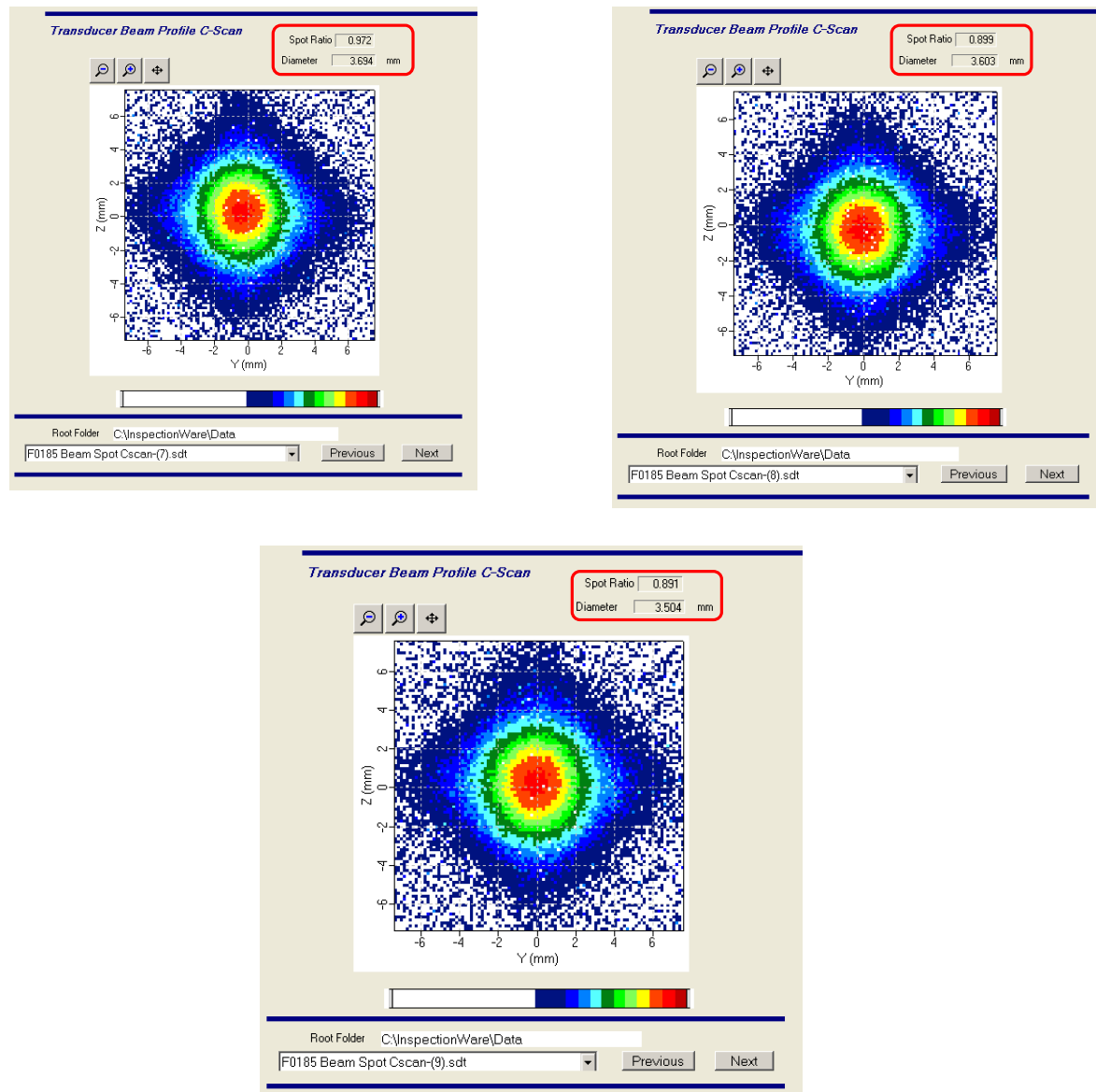
**c) En campo lejano, a 80 mm del reflector esférico:**

Realizando el ensayo en campo lejano, a 30 mm del punto de máxima presión acústica (o, lo que es lo mismo, a 80 mm del reflector esférico), con ganancia de 54 dB y apertura de 8 elementos al igual que en los casos anteriores, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 8.6 y figura 8.22:



	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diámetro (mm)	3.694	3.603	3.504
Simetría	0.972	0.899	0.891

**Tabla 8.6:** Resultado del diámetro y simetría de los haces a la distancia de 80 mm, campo lejano.



**Figura 8.22:** Resultado del C-Scan del reflector esférico para cada uno de los haces.

Antes de realizar este ensayo se preveía que el C-Scan saliese de mucho mayor diámetro que en los casos anteriores. Sin embargo, esto no ocurrió así, sino que desapareció la zona de

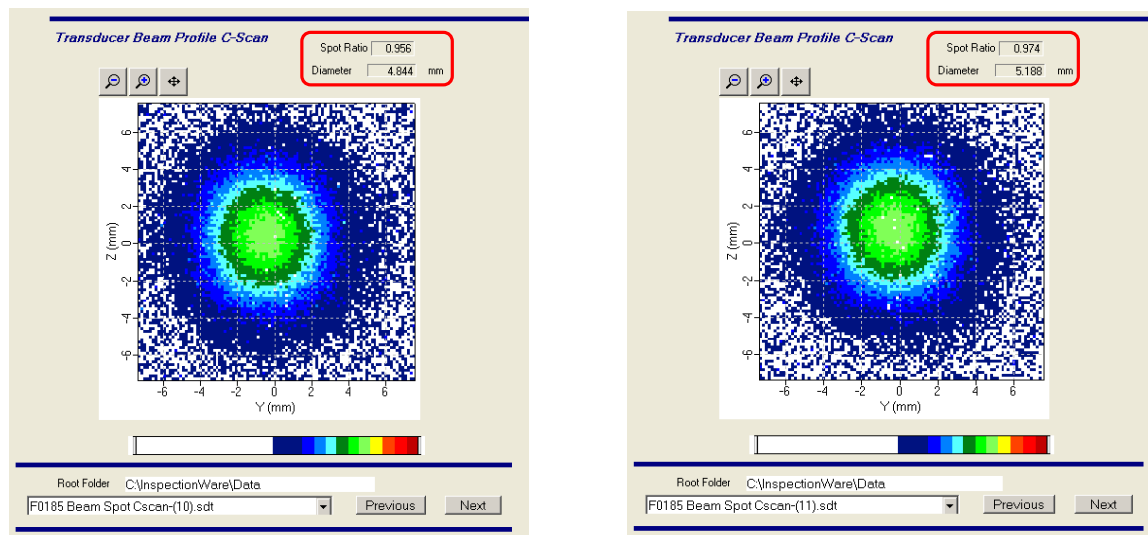
color rojo oscuro en el centro, que es la de máxima presión acústica, es decir, se atenuó la señal. Para obtener el resultado previsto se debería aumentar la ganancia en el equipo de ultrasonidos. Por otro lado, cabe destacar que el resultado de simetría del haz para cada uno de los grupos es correcto según la normativa aplicable.

**d) En campo lejano, a 120 mm del reflector esférico:**

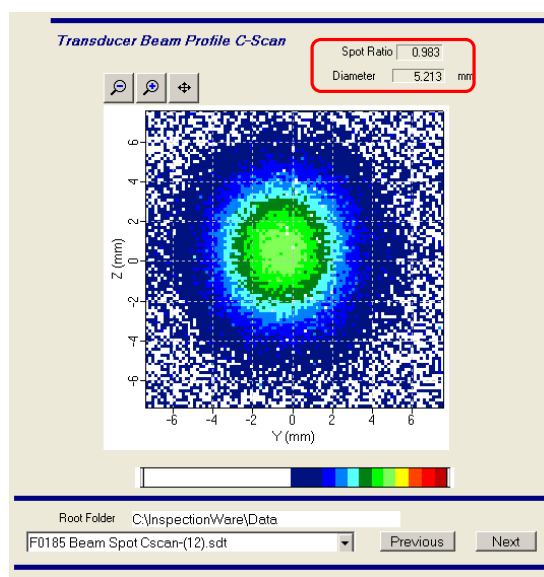
Alejando aún más el palpador del reflector esférico, esta vez a 120 mm del mismo, se vuelve a repetir el ensayo. Se sigue empleando la misma ganancia que en los casos anteriores,  $G=54$  dB, y apertura de 8 elementos y los resultados fueron los expuestos en la tabla 8.7 y figura 8.23 para cada uno de los grupos:

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diámetro (mm)	4.844	5.188	5.213
Simetría	0.956	0.974	0.983

**Tabla 8.7:** Resultado del diámetro y simetría de los haces a la distancia de 120 mm, campo lejano.



**Figura 8.23:** Resultado del C-Scan del reflector esférico para cada uno de los haces.



**Figura 8.23 (cont.):** Resultado del C-Scan del reflector esférico para cada uno de los haces.

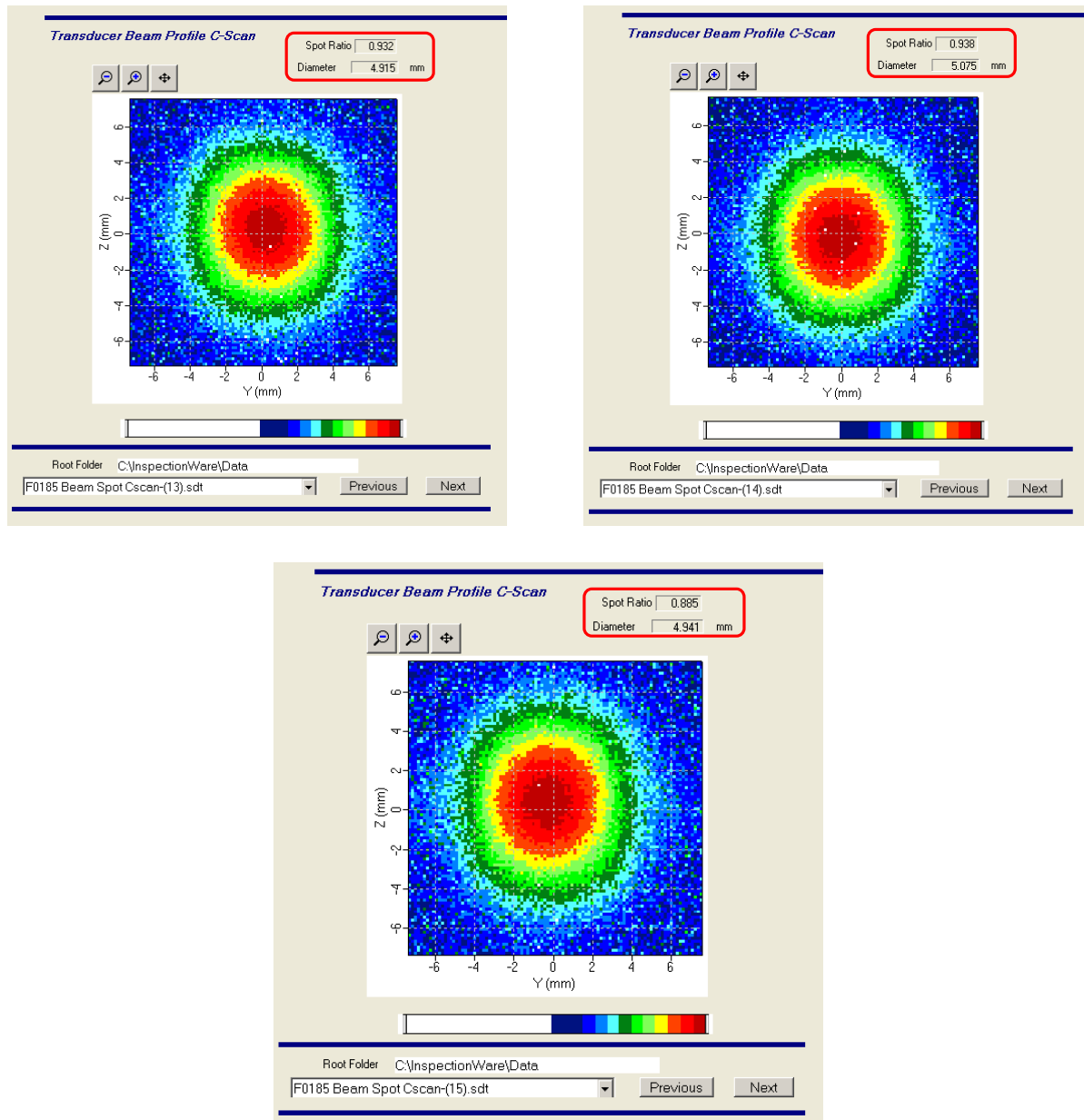
Observando la figura se sigue apreciando claramente la pérdida de colores en el C-Scan; se atenúa demasiado la señal, por lo que necesita aportar mucha más ganancia mediante el equipo de ultrasonidos. Por otro lado, el diámetro del C-Scan en los tres grupos aumenta, debido a la divergencia del haz que se produce en el campo lejano, y el resultado de simetría sigue siendo válido según el criterio de la normativa aplicable.

**e) En campo lejano, a 120 mm del reflector esférico, aumentando G:**

Esta vez se repite el ensayo en las mismas condiciones anteriores, pero aumentando la ganancia hasta  $G=63$  dB, para conseguir una amplitud de señal ultrasónica de, aproximadamente, el 85% de altura de pantalla (esta amplitud había ido disminuyendo a medida que se incrementaba la distancia del palpador al reflector esférico). Los resultados obtenidos fueron los que se presentan a continuación en la tabla 8.8 y figura 8.24:

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Diámetro (mm)	4.915	5.075	4.941
Simetría	0.932	0.938	0.885

**Tabla 8.8:** Resultado del diámetro y simetría de los haces a la distancia de 120 mm, C. Lejano, aumentando G.



**Figura 8.24:** Resultado del C-Scan del reflector esférico para cada uno de los haces.

Ahora sí se obtiene el resultado esperado: diámetro mucho mayor que en los otros casos, por la divergencia que se produce del haz. Por otro lado, el valor de simetría obtenido cumple con el criterio de la norma aplicable. No obstante, normalmente nunca se evalúan los palpadores a una distancia mayor de la de máxima presión acústica, por la pérdida de energía que tiene lugar, como se ha visto.



A la vista de todos estos resultados de los ensayos de diámetro y simetría del haz, se puede concluir diciendo que la distancia a la que se optimiza la señal, a la que se obtienen mejores resultados para una menor ganancia aportada, y que debe ser empleada a la hora de trabajar, es la de máxima presión acústica o  $Y_{0+}$ .

### **8.2.3 DOCUMENTACIÓN FINAL**

#### **i. Procedimiento oficial**

Una vez finalizados los ensayos y pruebas para optimizar el proceso de evaluación de palpadores Phased Array, se dedicó el siguiente período de tiempo a elaborar una memoria donde se indica detalladamente, paso a paso, el procedimiento a realizar para conseguir evaluar un palpador en su totalidad.

Esta documentación fue designada “Procedimiento de evaluación de palpadores de ultrasonidos Phased Array”, y se aplica, empleando la técnica de pulso-eco, a todos los transductores de este tipo que estén destinados a inspecciones de elementos fabricados por Airbus y subcontratistas, tanto en instalaciones automáticas, como en equipos semiautomáticos o manuales. Mediante esta evaluación, se estará en disposición de determinar la conformidad o no conformidad de los palpadores.

Este Procedimiento consta de 31 páginas y se encuentra en formato oficial de Airbus Operations S.L. Para ello fue aprobado previamente por José Manuel Martín de Bernardo (NDT Lab & Structural Tests Follow-up y tutor en la empresa de este proyecto) y autorizado por Álvaro Espada (Head of NDT & Mechanical Test Spain), con fecha 21 de Diciembre de 2009.

En este documento se describen los objetivos del procedimiento, los materiales y equipos a utilizar, se enumeran los parámetros a evaluar (tanto para palpadores de primera evaluación, como para los de evaluación periódica) y, finalmente, se detallan los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso, desde el encendido del equipo y conexión del palpador,





hasta la realización de todos y cada uno de los ensayos necesarios, haciendo distinción entre palpadores de contacto o de inmersión debido a que el procedimiento sufre alguna variación según sea el caso.

## **ii. Informe de resultados**

Tras finalizar las pruebas y ensayos de evaluación de los palpadores, se han de suministrar los resultados obtenidos a la empresa solicitante (y, en este caso, cliente) donde se indica la conformidad o no conformidad del palpador, en conjunto y de cada uno de sus elementos individuales, para continuar su vida en servicio en las inspecciones.

Este informe está compuesto por los siguientes documentos:

- Dos hojas Excel, donde se incluyen los datos del Análisis en Frecuencia, Damping y Sensibilidad, y de la Determinación de  $Y_{0+}$  y del Diámetro y Simetría del haz, respectivamente.
- Un documento Word que constituye la portada de dicho informe, y que recoge un resumen de los parámetros empleados en los ensayos y de los resultados obtenidos, siendo firmado por la persona que lo prepara y la que lo revisa.

En la parte superior de las hojas Excel se encuentra una tabla, relacionada con las posiciones en las que se han de colocar los resultados de los ensayos, donde se recogen los criterios de la Norma AITM6-0016 [1] que se han de cumplir para determinar que el palpador está en condiciones satisfactorias, tanto para elementos individuales como para requerimientos de grupo. Si alguno de estos criterios no se cumple para alguno de los resultados, automáticamente la celda donde se encuentre se quedará rellena de color naranja o rojo, según sea el caso. Además de estos resultados numéricos, en estas hojas se detallan los parámetros empleados en la evaluación del palpador (como pueden ser: apertura, voltaje aplicado en el equipo de ultrasonidos, PRF o Frecuencia de Repetición de Impulsos, etc.) y se



colocan algunas figuras ejemplo de las pruebas realizadas en las que se demuestre el buen o mal resultado de las mismas.

Como anexo a este proyecto se muestra un ejemplo tipo de este informe de evaluación que se ha explicado, correspondiente a un palpador cualquiera que está conforme para su utilización.

#### **8.2.4 PUESTA EN MARCHA**

Finalmente, a partir de los ensayos realizados que permiten tener pleno conocimiento del comportamiento de estos palpadores, del Procedimiento redactado y autorizado y la creación del modelo de informe de resultados, se está en perfecta disposición de llevar a cabo las evaluaciones de todos los palpadores Phased Array que sean solicitados, tanto por Airbus como por sus empresas subcontratistas.

Desde la fecha de entrada en vigor del Procedimiento oficial se han evaluado un total de más de 20 palpadores Phased Array con variedad en el número de elementos, corroborando la efectividad del proceso a seguir.

Así mismo, se dedicó un período de tiempo para comprobar la validez del procedimiento por personal ajeno al proceso de evaluación de palpadores Phased Array, comprobando que podía ser seguido paso a paso con relativa facilidad y que cubría totalmente los requerimientos especificados para el mismo.



### 8.3 TIEMPOS

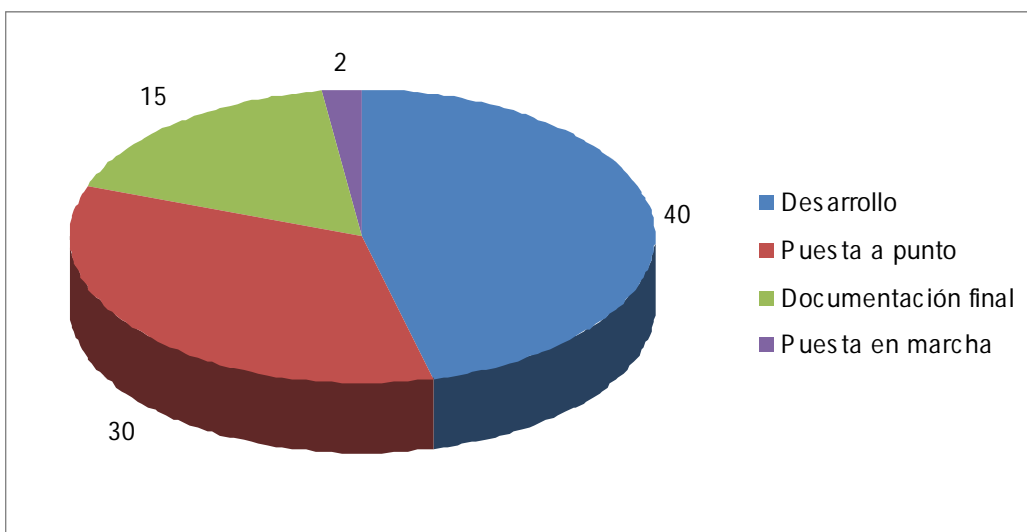
---

El tiempo total dedicado a la creación del Procedimiento de evaluación de palpadores Phased Array fue, aproximadamente, de 4 meses en horario laboral, desde septiembre a diciembre de 2009, ambos incluidos.

Las diferentes fases por las que se pasó, así como el tiempo empleado en cada una de ellas, se detallan a continuación:

- *Desarrollo*: dos meses para la recopilación de documentación, revisión de normativas de ensayos, conocimiento del software de evaluación y del comportamiento del palpador.
- *Puesta a punto*: un mes y medio, aproximadamente, dedicado a realizar los diversos ensayos de optimización que se explicaron en el subapartado 8.4.2 de este capítulo.
- *Documentación final*: se necesitó un período de tres semanas para llevar a cabo la redacción del Procedimiento paso por paso, incluyendo fotografías e imágenes tomadas del software, y del modelo de informe de los resultados de la evaluación con la portada que lo acompaña.
- *Puesta en marcha*: se revisó en un período de unos dos días, y lleva en funcionamiento desde que se creó el Procedimiento definitivo en formato oficial hasta el momento en que nos encontramos.

En la figura 8.25 que se muestra seguidamente se puede observar cómo se distribuyó el tiempo entre las diversas fases que tuvieron lugar en la creación del Procedimiento de evaluación de palpadores Phased Array. En ella se aprecia, a simple vista, que la fase de desarrollo fue considerablemente la de mayor duración, debido a la gran dificultad que entraña este tipo de palpadores, como ya se ha explicado anteriormente.



**Figura 8.25:** *Gráfico sectorial de la distribución de tiempos de las diversas fases de la creación del Procedimiento.*



## **CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS**





## **CAPÍTULO 9**

### **CONCLUSIONES**

Del mismo modo que se han ido perfeccionando los procesos de fabricación y optimizando el diseño y cálculo de piezas fabricadas con materiales compuestos, los métodos de inspección no destructiva han ido evolucionando. Se ha producido un progreso de la tecnología Phased Array frente a la convencional, solventando así los problemas en cuanto a cobertura de barrido, llegando a zonas antes inalcanzables, unido al ahorro de tiempo y a la mayor calidad en las inspecciones.

Debido al auge de esta tecnología, y al aumento del número de palpadores Phased Array utilizados en las empresas para la realización de inspecciones por ultrasonidos, surge la necesidad de la creación de un procedimiento específico para la evaluación de los mismos.

Este Procedimiento, fundamento del presente proyecto, dicta paso a paso el proceso que hay que seguir para evaluar este tipo de palpadores Phased Array, poniendo de manifiesto las diferencias que existen entre el procedimiento para los mismos y para los convencionales, en cuanto a ensayos a realizar y la dificultad de los mismos.

Estas discrepancias tienen lugar debido a los múltiples elementos que componen cada palpador, que han de ser analizados, y donde el comportamiento de tan sólo un elemento que esté defectuoso afectará al haz del que forma parte. Por otro lado, también cabe destacar la dificultad de toda la electrónica que lleva implícita un palpador de este tipo, frente a la mayor sencillez de los convencionales: el fabricante ha de garantizar la homogeneidad requerida mediante estrictos controles de calidad de los materiales piezoeléctricos, los materiales utilizados y el cable de conexión, fundamentalmente.



Una vez superadas estas dificultades, comprendido bien el funcionamiento del software de evaluación de los palpadores y realizados los diversos ensayos de optimización, se puede concluir lo siguiente, que ha quedado demostrado en el capítulo 8:

- El Análisis en frecuencia ha de realizarse en contacto en lugar de inmersión, empleando un bloque patrón de PMMA, ya que sus características acústicas son similares a los de los materiales compuestos de CFRP.
- El ensayo de Diámetro y Simetría del haz se debe efectuar utilizando una apertura del tamaño que permita maximizar la señal con la menor ganancia posible, siendo normalmente de 8 elementos, y a una distancia de trabajo igual al punto de máxima presión acústica o  $Y_0+$ .

Por otro lado, como aspecto general de las conclusiones de este proyecto fin de carrera, se han de destacar las numerosas ventajas que ha supuesto para una empresa como Airbus Operations S.L la creación de este Procedimiento de evaluación de palpadores de tecnología Phased Array. Algunas de éstas fueron las que siguen:

- Mayor calidad en el suministro del material deseado: la tecnología Phased Array aporta una mayor capacidad de detección de defectos en los elementos fabricados.
- Hasta la fecha sólo existía un Procedimiento de evaluación de palpadores de uso convencional, por lo que supone un gran adelanto.
- Ahorro de costes por la reducción del tiempo de inspección y aumento de la calidad, pero para ello se exige:
  - Control y vigilancia del uso del palpador, para evaluar su degradación en su vida en servicio.
  - Evaluación periódica de estos palpadores cumpliendo con la normativa aplicable, que requiere más tiempo y gasto económico que para los convencionales.



- Elección de los palpadores y parámetros óptimos para las inspecciones en las que se vayan a emplear, debido a que unos son más adecuados que otros en función de la situación.
- El porcentaje de reducción de tiempo empleando la tecnología Phased Array frente a la convencional es realmente significativo: como ejemplo para ilustrar este hecho cabe destacar que, en la inspección de 1000 revestimientos del estabilizador horizontal (HTP) del A320 producidos, se emplean aproximadamente 1000 horas con un palpador convencional y, sin embargo, empleando la tecnología Phased Array esto puede realizarse en unas 250 horas, lo que supone una reducción del 75% del tiempo total empleado.



**Figura 9.1:** Ejemplo de inspección automática de un revestimiento de un HTP. [4]

- Como una de las aportaciones más importantes hay que destacar que, sin la puesta a punto de este Procedimiento de evaluación, no se podrían utilizar las instalaciones automáticas de inspección de elementos fabricados en fibra de carbono para Airbus Operations S.L. y subcontratistas que las utilicen, dado que no se podría certificar la conformidad de los palpadores para su uso en ellas (que se encuentren en perfectas condiciones).



- Es un Procedimiento totalmente novedoso y puntero, que permite destacar a la empresa Airbus Operations S.L. de cualquier otra en este campo, suponiendo una ventaja competitiva para ella.



## **CAPÍTULO 10**

### **LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS**

A lo largo del desarrollo del proyecto se han detectado algunos factores que se podrían mejorar, principalmente del proceso y del software de evaluación de los palpadores, así como la posibilidad de trabajos futuros. Todo esto se enumera a continuación:

- Mayor automatización del proceso de ensayos de evaluación: Hoy en día, la evaluación es realizada por un inspector que analiza los resultados obtenidos de los ensayos que, en la mayoría de los casos, son numéricos y pueden compararse con los requerimientos de la normativa aplicable; sin embargo, en otros ensayos se deja lugar a la subjetividad, pudiendo dar lugar a fallos en las interpretaciones si hay falta de acuerdo entre los diversos inspectores.  
Otro posible aspecto a mejorar mediante automatización es la toma del resultado numérico del Factor de Amortiguamiento, para cada uno de los elementos que componen el palpador, a partir de la gráfica que devuelve el software. Este hecho se hace indispensable, sobre todo, para los palpadores de 128 elementos, dado que se trata de un proceso muy laborioso y que conlleva una gran pérdida de tiempo (así también se dejaría de lado el factor de la subjetividad del inspector que realice la evaluación del palpador).
- Mejoras en el software de evaluación de los palpadores Phased Array: Cabría la posibilidad de añadir un botón que permita que, al seleccionarlo, el eje X de la cuba de inmersión se pusiera a cero, estableciéndose así el origen de coordenadas en el punto deseado. En el software actual, esta opción sólo está implementada para los ejes Y y Z, mientras que el programa informático empleado para palpadores convencionales, esto puede realizarse en todos los ejes.



- Como trabajo futuro se plantea la adaptación del Procedimiento de evaluación de palpadores Phased Array creado y del sistema utilizado, optimizándolo para palpadores de esta tecnología que tengan geometría curva.



## **BIBLIOGRAFÍA**





## BIBLIOGRAFÍA

- [1] NORMA AITM 6-0016, ISSUE 2: “*Evaluation of phased array ultrasonic inspection facilities, equipment and probes*”. Airbus S.A.S. Septiembre 2008.
- [2] (<http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/phased-array/>)
- [3] *Curso de inspección no destructiva*. Airbus, Junio 2007.
- [4] AIZPURUA ITURRIALDE, U. Proyecto Fin de Carrera. *Desarrollo de sistemas automáticos y semiautomáticos para la inspección no destructiva de componentes de fibra de carbono basados en Tecnología Ultrasónica Phased Array*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Febrero 2008.
- [5] *Informe interno I497\_07*. Airbus Operations S.L. (2007)
- [6] GÓMEZ DE LEÓN, E. *Ultrasonidos Nivel II*; END. Fundación Confemetal Editorial.
- [7] MARTÍN ESTEBAN, J. A. Proyecto Fin de Carrera. *Estudio, desarrollo e implementación de modernas técnicas de inspección ultrasónica basadas en la tecnología Phased Array. Aplicaciones a actuales diseños en composites*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos. Octubre 2005.
- [8] *Phasor XS*: GE Inspection Technologies.
- [9] *Workshop Phased Array: introducción y nuevas técnicas*. Dasel Sistemas e Instituto de Automática Industrial (IAI) del CSIC. Arganda del Rey, Diciembre 2009.



- [10] CASULA, O., POIDEVIN, C., CATTIAUX G., and FLEURY, G. *A flexible Phased Array transducer for contact examination of component with complex geometry.*
- [11] NORMA AITM 6-0013, ISSUE 3: “*Evaluation of conventional ultrasonic inspection, equipment and probes*”. Airbus S.A.S. Septiembre 2008.
- [12] NORMA I+D-E-296: “*Evaluación de palpadores de ultrasonidos*”. Airbus Operations S.L.
- [13] DÁVILA RUIZ, M.E. *Procedimiento de evaluación de palpadores de ultrasonidos Phased Array*. Laboratorio de Ensayos No Destructivos, Departamento de I+D, Airbus Operations S.L. Diciembre 2009.
- [14] *Curso básico de formación de materiales compuestos*. Airbus, Septiembre 2005.
- [15] *Informe interno I097\_10*. Airbus Operations S.L. (2010)
- [16] RAMÍREZ, E., FERNÁNDEZ SOLER, M.A., ALONSO, A., DELOJO, G., VALDECANTOS, C. y RÍOS, J.M. *Métodos de Ensayos No Destructivos*. INTA.
- [17] *Phased Array Technical Guidelines*. RD Tech.
- [18] POGUET, J., GARCÍA, A., VÁZQUEZ, J., MARGUET, J., PICHONNAT, F. *Phased Array Technology, Concepts, Probes and Applications*. 8<sup>th</sup> European Congress on Non Destructive Testing. Barcelona, June 17-21, 2001.
- [19] WEIGANG, ET AL. *The Methods and Effects of Transducer Degradation on Image Quality and the Clinical Efficacy of Diagnostic Sonography*. Transducer Analysis and Repair Laboratory, Sonic Technology Laboratories, Sonora Medical Systems, Longmont Colorado.





- [20] WÜSTENBERG, H., ERHARD, A. and SCHENK, G. *Scanning Modes at the Application of Ultrasonic Phased Array Inspection Systems*. 15<sup>th</sup> WCNDT. Roma (2000).
- [21] CAMPBELL, F.C. *Manufacturing Processes for Advanced Composites*. Elsevier. ISBN 1-8561-7415-8.
- [22] *Reinforced Plastics*, Volume 49, Issue 8, Pages 42-47. September 2005.
- [23] LAFONTAINE, G., CANCRE, F. *Potential of Ultrasonic Phased Arrays for Faster, Better and Cheaper Inspections*. 2<sup>nd</sup> International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components. New Orleans, May 2000.
- [24] FREEMANTLE, R.J., HANKINSON, N., BROTHERHOOD, C.J. *Rapid Phased Array Ultrasonics Imaging of Large Area Composite Aerospace Structures*. NDT Solutions Ltd, Dunston Innovation Centre, Chesterfield, UK.
- [25] ENGL, G., BRANDT, R. M. *Testing large aerospace CFRP components by ultrasonic multichannel conventional and Phased Array Pulse-echo techniques*. 8<sup>th</sup> ECNDT. Barcelona, June 2002.
- [26] MEYER, P. ANDERSON, J. W. *Ultrasonic Testing Using Phased Arrays*. Krautkramer Branson. Lewiston, PA USA.





## ***ANEXOS***



HOJA DE EVALUACIÓN DE PALPADORES DE ULTRASONIDOS

SOLICITADO POR: Fª GETAFE  
ESPECIFICACIÓN APLICABLE: AIMM 6-0016  
PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN:

HOJA Nº1 DEL INFORME DE  
EVALUACIÓN DE PALPADORES  
PHASED ARRAY: PORTADA

TIPO DE EVALUACIÓN	
1ª EVALUACIÓN	<input checked="" type="checkbox"/>
PERIÓDICA	<input type="checkbox"/>
NO PROGRAMADA	<input type="checkbox"/>

**IDENTIFICACION DEL PALPADOR**

FABRICANTE: RD-TECH
REFERENCIA: F0189
CÓDIGO:
FRECUENCIA NOMINAL (MHz): 5
Nº ELEMENTOS: 24

TIPO	
PHASED ARRAY	
CONTACTO	X
INMERSIÓN	

PARÁMETROS DE EVALUACIÓN
ANÁLISIS EN FRECUENCIA
SENSIBILIDAD
FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO
GEOMETRÍA DEL HAZ

CONDICIONES DE ENSAYO	
EQUIPO:	USN 60
	CÓDIGO: BE6A7288
FRECUENCIA (MHz):	BANDA ANCHA ( $2 < f < 30$ )
DISTANCIA DE TRABAJO (mm):	50
ATENUACIÓN (ohmios):	150
TIPO ONDA:	completa
PRF (MHz):	2,3
INTENSIDAD:	Alta
TIPO EMISOR:	Impulso
FILTROS:	Ninguno

RESULTADO	PREPARADO	REVISADO
CONFORME	M. A. DE DIEGO	J. M. MARTIN

**OBSERVACIONES:**

En consecuencia se considera el **palpador conforme** por un período de 24 meses, a partir de la fecha de emisión de este documento.  
Se considera esta evaluación como la de recepción y servirá de referencia para futuras evaluaciones.

# HOJA N°2 DEL INFORME DE EVALUACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY: RESULTADOS DEL ANÁLISIS EN FRECUENCIA

## Element tests

Probe serial number F0189  
Aperture 1  
Nominal fc (MHz) 5

It does not meet the individual requirements  
It does not meet the group requirements

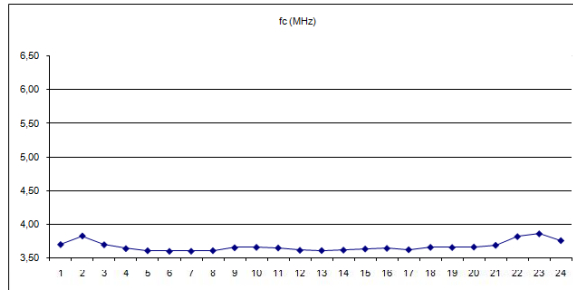
	Elt	Group	3.5
fc	30%	10%	6.5
Bandwidth	45%	10%	2.25
Sensitivity	1	3	

AIRBUS OPERATIONS S.L.-EDSWNM  
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

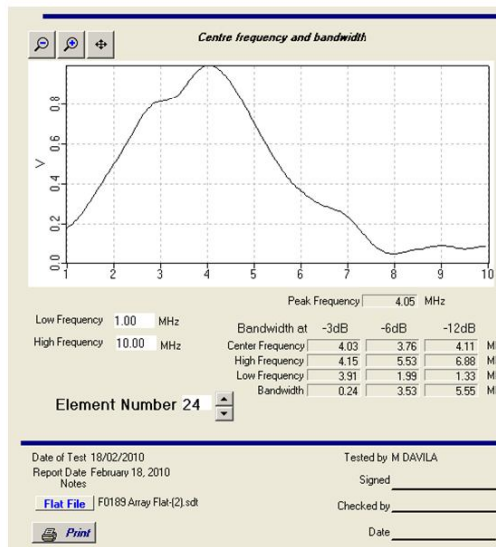
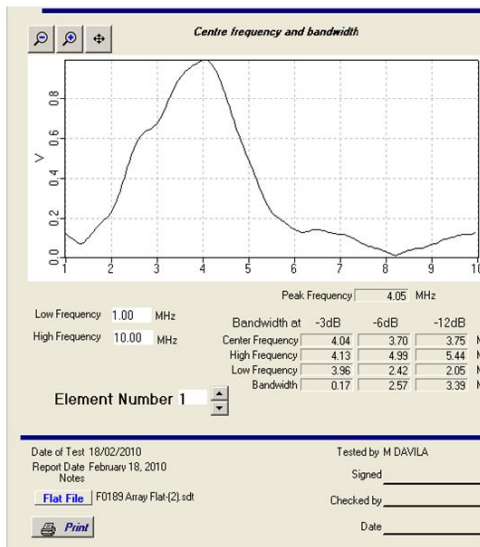
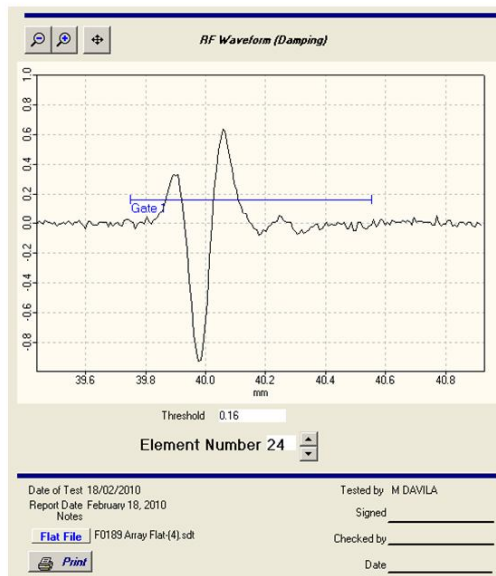
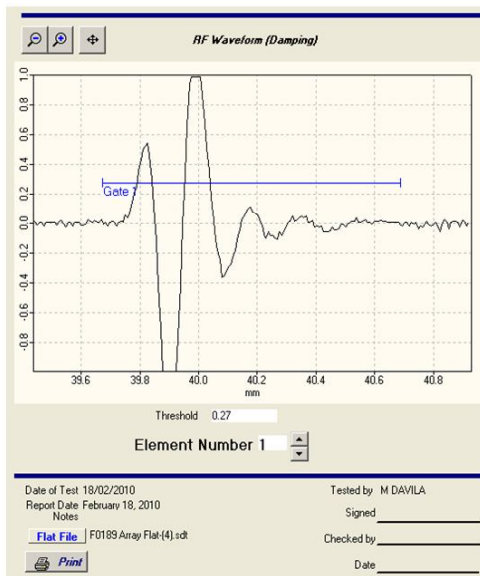
INSP. N° 068/10  
Fecha 18/02/2010

Elt	fc (MHz)	Bandwidth (MHz)	Sensitivity dB	Sensitivity %FSH	Damping factor
1	3.70	2.57	0.00	100.00	3
2	3.83	2.61	-0.02	99.74	3
3	3.70	2.92	0.00	100.00	2
4	3.64	3.14	-0.06	99.35	2
5	3.61	3.26	0.00	100.00	2
6	3.60	3.22	0.00	100.00	2
7	3.61	3.32	0.00	100.00	2
8	3.61	3.34	0.00	100.00	2
9	3.66	3.15	0.00	100.00	2
10	3.66	3.24	0.00	100.00	2
11	3.65	3.22	0.00	100.00	2
12	3.62	3.20	0.00	100.00	2
13	3.62	3.14	0.00	100.00	2
14	3.62	3.09	-0.06	99.30	2
15	3.64	3.19	0.00	100.00	2
16	3.65	3.14	-0.06	99.30	2
17	3.63	3.11	0.00	100.00	2
18	3.66	3.09	0.00	100.00	2
19	3.66	3.05	-0.01	99.91	2
20	3.67	3.10	0.00	100.00	2
21	3.69	3.10	-0.06	99.31	2
22	3.82	3.03	0.00	100.00	2
23	3.86	3.46	0.00	100.00	2
24	3.76	3.53	0.00	100.00	2

fc (MHz)	Bandwidth (MHz)	Sensitivity (%FSH)	(dB)
Max 3.86	Max 3.53	Max 100.00	0.00
Min 3.60	Min 2.57	Min 99.30	-0.06
Average 3.67	Average 3.13	Average 99.87	-0.01



Gain 56 dB  
Voltage 200 V  
Width 80 ns  
PRF 2300 Hz



# HOJA N°3 DEL INFORME DE EVALUACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY: RESULTADOS DEL ENSAYO DE DIÁMETRO Y SIMETRÍA DEL HAZ

## Beam Tests

Probe serial number F0189  
Aperture 8

It does not meet the individual requirements  
It does not meet the group requirements

Aperture	Group
Yo+	1
Symmetry	0.75

AIRBUS OPERATIONS S.L.-EDSWNM  
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

INSP. N° 068/10  
Fecha 18/02/2010

Gain (dB)	Beam	First Elt	Last Elt	Yo+ (mm)	Beam test distance (mm)
55	1	1	8	50	50
55	2	9	17	50,36	50
55	3	18	24	50	50

Diameter (mm)	Symmetry
3,11	0,90
3,47	0,97
3,40	0,85

## Symmetry

Max 0,97  
Min 0,85  
Average 0,90

Gain 55 dB  
Voltage 200 V  
Width 80 ns  
PRF 2300 Hz

